

КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ РЕА

Методичний посібник з лекційних та лабораторних робіт

Чернівці 2023

Укладач: Микола КУШНІР – доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки.

Зміст

1. Основні методи, завдання і процеси автоматизованого проектування
2. Загальні відомості про САПР
3. Основні характеристики та методи побудови математичних моделей компонентів та об'єктів РЕА
4. Методи автоматичного розрахунку статичних схемотехнічних моделей електронних пристроїв
5. Методи автоматизованого розрахунку динамічних схемотехнічних моделей радіоелектронних пристроїв
6. Методи автоматизованого проектування РЕА на функціональному рівні
7. Методи автоматизованого проектування РЕА на структурному рівні
8. Конструкторське проектування
9. Цикл лабораторних робіт програми *Micro Cap*
10. Приклади роботи схем програми *MultiSim*
11. Приклади тестових екзаменаційних завдань

1. Основні методи, завдання і процеси автоматизованого проектування

Процес автоматичного проектування (АП) – розв’язок кінцевої послідовності задач певної складності в режимі взаємодії людини та ЕОМ.



Рис.1. Етапи процесу проектування РЕЗ.

Етапи процесу проектування РЕЗ:

1. Системотехнічний; 2. Схемотехнічний; 3. Технічний (рис.1);

Склад технічного завдання (ТЗ):

1. Виконавчі функції об'єкта проектування.
2. Кількісні вимоги до функціональних параметрів.

Параметри елементів РЕЗ:

1. Вихідні параметри – кількісні показники, які характеризують функцію, виконувану об'єктом.
2. Внутрішні параметри – параметри складових об'єкта.
3. Зовнішні параметри – параметри зовнішнього щодо проектуючого об'єкта середовища.
4. Фазові змінні – величини, які характеризують фізичний або інформаційний стан об'єкта.

$Y (y_1, y_2, \dots, y_n)$ – вектор системи вихідних параметрів, $X (x_1, x_2, \dots, x_m)$ – вектор системи внутрішніх параметрів, $Q (q_1, q_2, \dots, q_k)$ – вектор системи зовнішніх параметрів.

$Y = F (X, Q)$ (1) – математична модель довільного етапу проектування.

Принципи проектування:

1. Декомпозиційний принцип – розбиття складної задачі на більш прості;
2. Ієрархічний принцип – характеризується етапами (рівнями) проектування;
3. Ітераційний принцип – послідовне наближення до виконання заданих вимог;
4. Принцип уніфікації задач та складових частин об'єктів проектування;
5. Принцип контрольованості етапів проектування.

2. Загальні відомості про САПР

Система автоматизованого проектування (САПР) – організаційно-технічна система, яка виконує АП.

Режими проектування в САПР:

1. Ручний (неавтоматизований) – без допомоги ЕОМ;
2. Автоматизований – частина проектних процедур виконується вручну, а частина – з допомогою ЕОМ.
3. Автоматичні – за формальними алгоритмами без втручання людини на ЕОМ.
4. Діалоговий (інтерактивний) – всі процедури на ЕОМ, але людина втручається в коректування та продовження:
 - 4.1. Активний діалог – ініціатор людина;
 - 4.2. Пасивний діалог – за командами з ЕОМ.
5. Пакетний – у режимі діалогу вводяться та редагуються тільки вихідні дані для маршруту проектування.

Компоненти САПР:

1. Математичне забезпечення – рівень мовних засобів, які перетворюють інформацію в системі.
2. Лінгвістичне забезпечення – методи та алгоритми проектування.
3. Інформаційне забезпечення – рівень для передачі атрибутів інформації про процес проектування.
 - 3.1. Логічна форма запису – запис як символи та цифри;
 - 3.2. Фізична форма запису – матеріалізована форма логічного запису (на фізичному носії – дискета, вінчестер);
 - 3.3. Способи організації розміщення записів:
 - 3.3.1. Послідовна організація – логічні записи розміщені один за одним;
 - 3.3.2. Пряма організація – ключ логічного запису однозначно визначає її фізичну адресу;
 - 3.3.3. Бібліотечна організація – записи поділяються на групи, розміщуються на початку файла й утворюють каталог;
 - 3.3.4. Індексно-

послідовна організація – логічні записи розміщуються в міру зростання значень їх ключів порядку (ієрархічна структура).

3.4. Типи моделей даних:

3.4.1. Асоціативна – виділяє частину інформації або окремі дані за загальною властивістю (наприклад усі ємності з усіх елементів схеми); 3.4.2. Послідовна – є зв'язок між попередньою та наступною частинами інформації; 3.4.3. Ієрархічна – окремі частини інформації розміщені на різних ієрархічних рівнях і утворюють довільні ланцюжки; 3.4.4. Реляційна – виділення смислових груп інформації з використанням реляційних розрахунків (“>”, “<”, “=” і т.д.).

4. Технічне забезпечення САПР – комплекс технічних засобів.

5. Методичне забезпечення САПР – документація.

6. Організаційне забезпечення САПР – регламентує взаємовідносини між проектувальниками та комплексом засобів АП.

7. Програмне забезпечення – сукупність програм.

Операційна система (ОС) – сукупність програм, які керують роботою ЕОМ, забезпечують узгодження роботи ЕОМ та поступаючих до неї програм користувача для максимальної завантаженості всіх пристроїв ЕОМ та виконують зв'язок ЕОМ з користувачем і з метою надання йому максимуму зручностей при розв'язку задачі.

Спеціалізована операційна система (СОС) – для керування виконанням конкретних прикладних програм із урахуванням їх змісту.

7.1.Пункти завдання при проектуванні РЕЗ:

7.1.1. Введення опису схеми РЕА; 7.1.2. Трансляція опису РЕА з вхідної мови у внутрішній формат; 7.1.3. Розрахунок статичного режиму; 7.1.4. Розрахунок перехідних процесів; 7.1.5. Друк результатів.

Предметні програми САПР – програми, які безпосередньо виконують моделювання станів та процесів в об'єктах проектування (якість САПР визначається якістю цих програм).

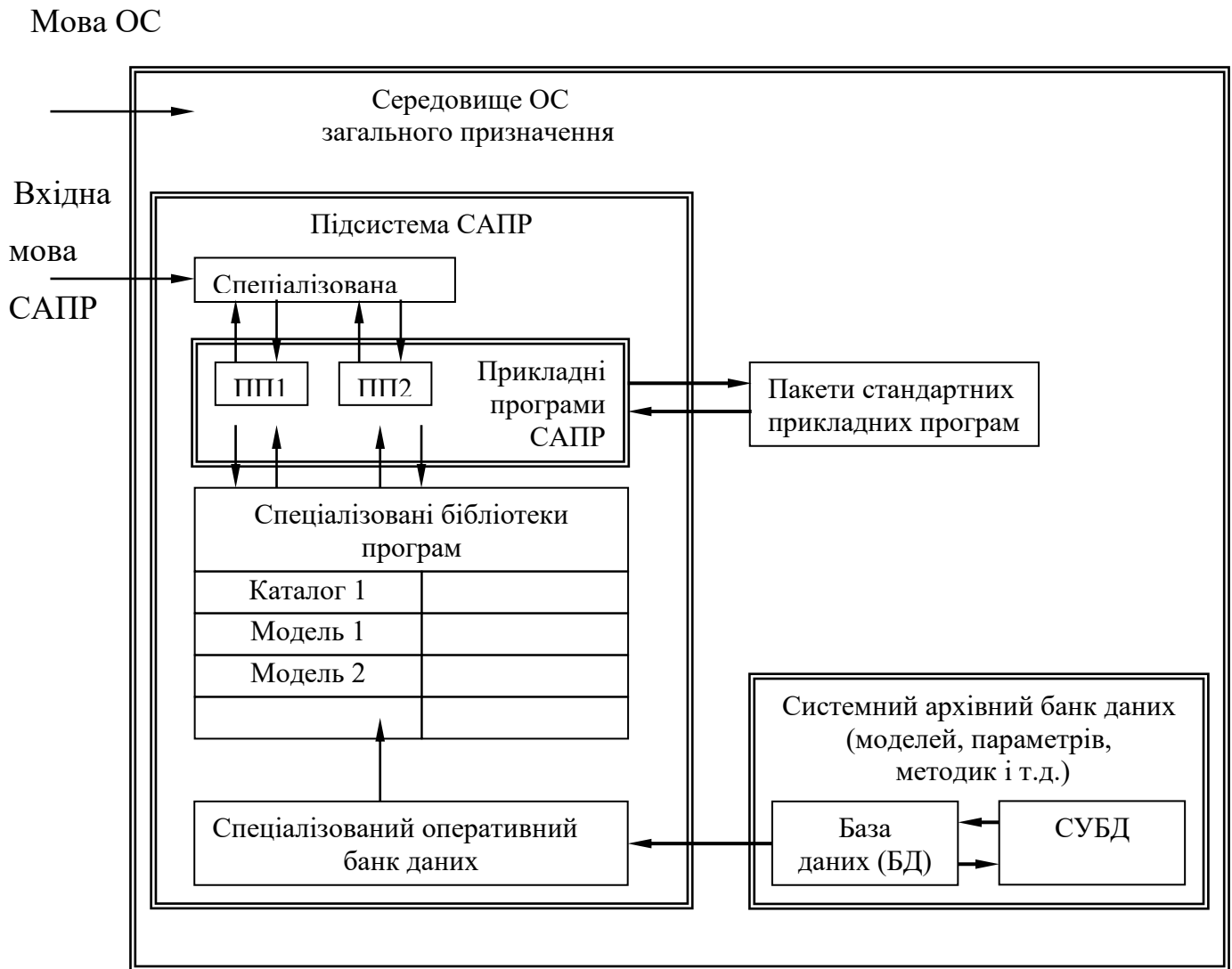


Рис.2. Функціонування САПР у середовищі ОС.

3. Основні характеристики та методи побудови математичних моделей компонентів та об'єктів РЕА

Моделювання – абстрагування від конкретного об'єкта та заміна його або фізичним аналогом, або математичним описом поведінки. Метод схеми заміщення – заміна елементів РЕА еквівалентними схемами (складні процеси та паразитні ефекти моделюються опорами (R), ємностями (C), індуктивностями (L), джерелами струму (I_0) та напруги (U_0)). Кінцева мета математичного моделювання РЕП – визначення струмів та напруг в усіх точках схеми протягом усього часу (після розв'язку складеної системи рівнянь).

Аналіз РЕП здійснюється в статичних та динамічних моделях.

3.1. Моделювання пасивних елементів

3.1.1. Опір. $R = \frac{U}{I}$, $\frac{1}{R} = G = \frac{I}{U}$ – математичні моделі $R=R(T,U,I)$

3.1.2. Джерела струму та напруги.



Схеми заміщення джерела струму (I_0) та напруги (U_0).

Групи джерел: 1. Незалежні; 2. Залежні; 3. Керовані.

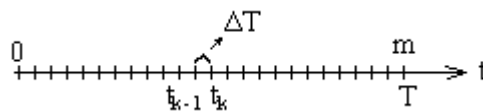
3.1.3. Ємність.

$f_c(q,U)=0$, $q=C \cdot U$. Частотна область:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} f(\omega) \quad (2)$$

$U = Z_c \cdot I$ – математична модель. Часова область: $I = \frac{dq}{df} = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$ (3) – для

математичного опису одержимо диференціальне рівняння.



Машинний метод:

$$I_k = \frac{C \cdot \Delta U_c}{\Delta t} = \frac{C \cdot (U_k - U_{k-1})}{\Delta t} \quad (4) \text{ – різницеве співвідношення}$$

$\frac{C}{\Delta t} = G_c$, $U_{k-1} \equiv U_0$ (відома величина з розрахунків на попередніх трьох

кроках, оскільки $U_c|_{t=0}$ задається як початкова умова). Тоді

$$I_k = \frac{U_k}{G_c} - \frac{U_0}{G_c} \Rightarrow U_k = I_k \cdot \frac{1}{G_c} + U_0 \quad (5) - \text{одержали різницеву модель ємності у}$$

вигляді схеми заміщення.

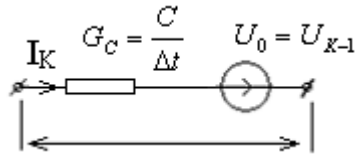


Рис.3. Схема заміщення ємності.

3.1.4. Індуктивність.

$f_L(\Psi, I) = 0$, $\Psi = L \cdot I$. Частотна область:

$$Z_L = j\omega L = f(\omega). \quad (6)$$

$U = Z_L \cdot I$ – математична модель. Часова область:

$$Z_L = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (7) - \text{математична модель у диференціальній формі.}$$

Машинний метод:

$$U_{L_k} = L \cdot \frac{\Delta I_k}{\Delta t} = L \cdot \frac{I_k - I_{k-1}}{\Delta t} \quad (8)$$

$I_L|_{t=0}$ – задається, тому I_{k-1} – відома величина з попередніх розрахунків.

$$G_L = \frac{\Delta t}{L} - \text{провідність. Тоді при } I_{k-1} \equiv I_0$$

$$U_k = \frac{I_k}{G_L} - \frac{I_0}{G_L} \Rightarrow I_k = U_k \cdot G_L + I_0 \quad (9) - \text{різницєва модель індуктивності.}$$

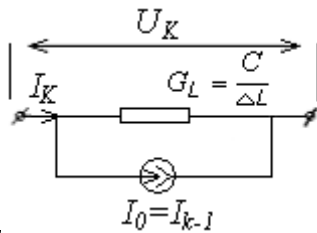
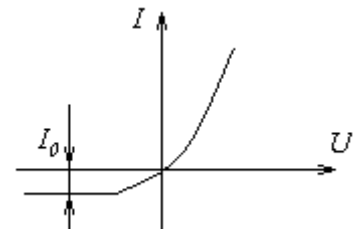


Рис.4. Схема заміщення індуктивності.

3.1.5. Напівпровідниковий діод.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{M \cdot \varphi_T}} - 1 \right) \quad (10)$$

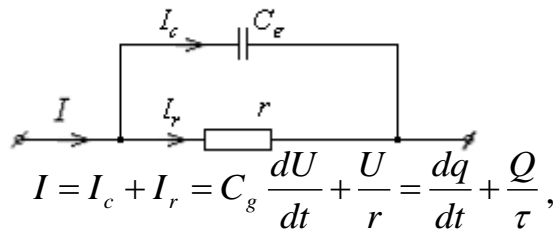


Інерційність процесів в $p-n$ - переході визначається накопиченням неосновних носіїв:

$$I = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau} - \text{змінна складова струму через } p-n - \text{перехід.}$$

Q – сумарна зміна заряду неосновних носіїв в $p-n$ - переході.

τ – ефективний час життя неосновних носіїв. Тоді



де $Q = C_g \cdot U$, $\tau = C_g \cdot r$

r – диференційний опір $p-n$ - переходу, який можна визначити з вольт-амперної характеристики:

$$\frac{1}{r} = \frac{dI}{dU} = \frac{I_0}{M \cdot \varphi_T} \cdot e^{\frac{U}{M \cdot \varphi_T}},$$

тоді $C_g = \frac{\tau}{r} = \frac{I_0 \tau}{M \cdot \varphi_T} \cdot e^{\frac{U}{M \cdot \varphi_T}}$ – дифузійна ємність. (11)

Вводиться $C_\delta = K \cdot U^{-1}$ – бар'єрна ємність. (12)

Зважатимемо ще на два фактори: 1) частина напруги U_g падає на об'ємних опорах $p-n$ - переходу, причому $r_{n-обл.} \gg r_{p-обл.}$ і $r_{n-обл.} \equiv r_{бази}$, а $r_{p-обл.} = 0$; при оберненому зміщенні треба враховувати струм через опір поверхневого витоку $R_{вит.}$; r_b і R_B вважаються лінійними.

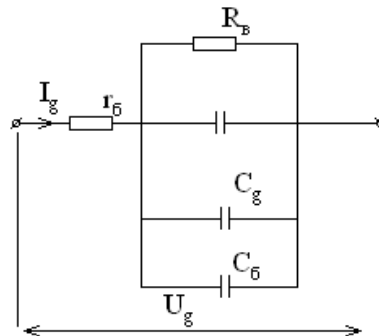


Рис. 5. Схема заміщення напівпровідникового діода.

Математична модель діода – єдине диференціальне співвідношення із змінними I_g та U_g . У статичній моделі $C_g = C_b = 0$.

3.2. Моделювання активних елементів

Способи моделювання транзисторів: 1. Пасивні двополюсники та керуючі джерела; 2. Багатополюсники.

Групи моделей транзисторів: 1. Нелінійні статичні; 2. Нелінійні динамічні; 3. Лінійні низькочастотні; 4. Лінійні високочастотні.

Види підходів до моделювання: 1. Формальне зображення у вигляді “чорного ящика”; 2. Побудова моделей на основі опису фізичних процесів в активному елементі.

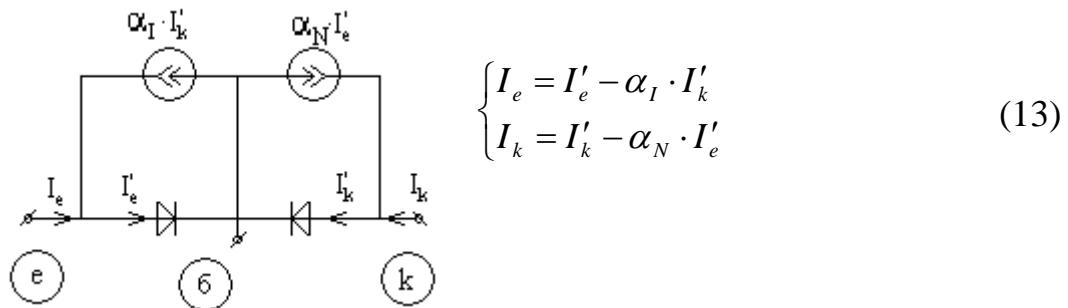


Рис. 6. Нелінійна статична модель (Еберса Мола).

I'_e, I'_k – струм емітерного та колекторного переходів (описуються вольт-амперними характеристиками).

α_N, α_I – коефіцієнти прямої та оберненої передачі струму (за схемою з спільною базою). Отже (13) – статичні ВАХ, на основі яких можна побудувати математичну модель.

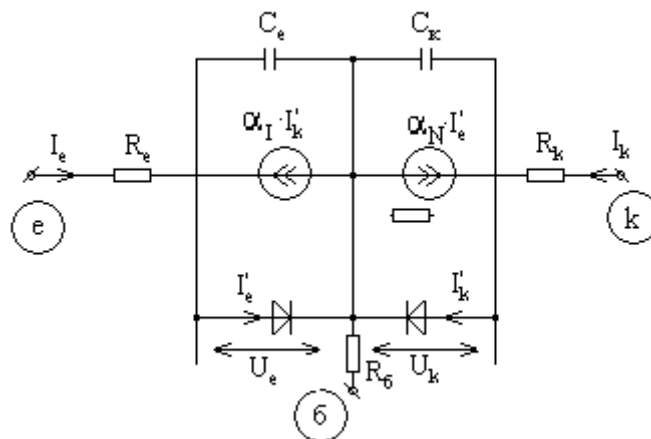


Рис. 7. Нелінійна динамічна модель (Еберса-Мола).

R_e, R_k, R_b враховує опори відповідних областей, а C_e, C_k моделює динамічні процеси, причому

$$\begin{cases} C_e = C_g^{(e)} + C_e^{(e)} \\ C_k = C_g^{(k)} + C_b^{(k)} \end{cases}$$

Моделі Еберса-Мола широко застосовуються (точність – 10-15%).

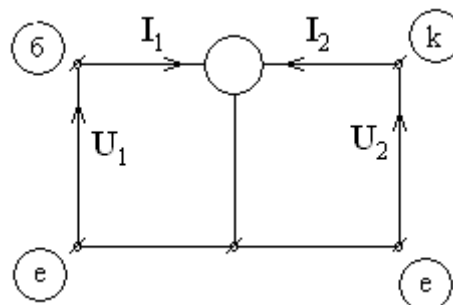


Рис. 8. Лінійна низькочастотна модель (формальне зображення)

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} U_1^{(e\delta)} = h_{11} \cdot I_1^{(\delta)} + h_{12} \cdot U_2^{(ek)} \\ I_2^{(k)} = h_{21} \cdot I_1^{(\delta)} + h_{22} \cdot U_2^{(ek)} \end{cases} \quad (14)$$

Це схема заміщення зі спільним емітером.

Коефіцієнти h_{ik} мають конкретний фізичний зміст (вхідний опір, вихідна провідність і т.д.) та знаходяться з диференціювання відповідних рівнянь за певних умов.

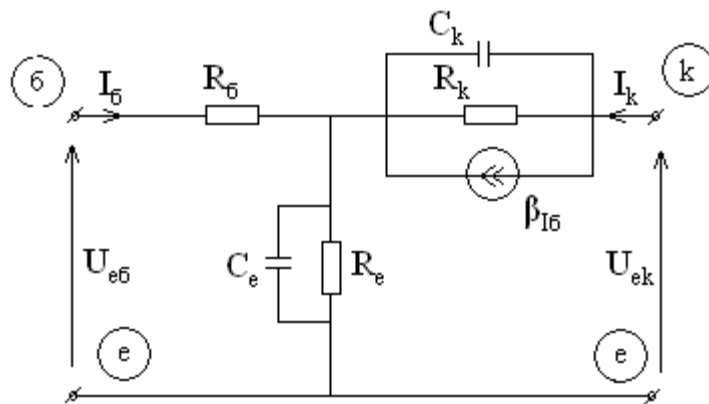


Рис. 9. Т-подібна лінійна високочастотна модель.

β визначає крутизну вихідного генератора струму

$$\beta = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N} \gg 1.$$

C_e, C_k – моделюють інерційність транзистора, причому

$$\begin{cases} C_e = C_g^{(e)} + C_e^{(e)} \\ C_k = C_g^{(k)} + C_\delta^{(k)} \end{cases}$$

Використовується наступне наближення:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{dI'_e}{dU'_e} = -\frac{\varphi_T}{I'_{e0} \cdot e^{\frac{\varphi_{e0}}{\varphi_T}}} \approx -\frac{\varphi_T}{I'_{e0}}, \text{ де } U_{e0}, I'_{e0} - \text{статичні напруга та струм, відносно}$$

яких змінюється високочастотний сигнал.

3.3. Моделювання радіоелектронних пристроїв

Види математичних моделей РЕП: 1. Загальна схема заміщення; 2. Загальна система рівнянь для всієї схеми.

Порядок складання схеми заміщення:

1. Вибір рівнянь для опису схеми. “Первинні” внутрішні параметри – площа р-п - переходу, N_A, N_ϕ , ширина бази, μ_n, μ_p і т.д. (для підприємств, які працюють із пристроями в інтегральному виконанні). Вторинні внутрішні параметри – вхідний та вихідний опори, коефіцієнти підсилення, крутизна ВАХ і т.д. (для підприємств, які працюють із окремими елементами).

Отже, вибір рівнянь та коефіцієнтів залежить від типу промислового підприємства.

2. Вибір схеми заміщення для нелінійного елемента.

$i = f(U)$ – джерело струму, $i - f(u) = 0 \Rightarrow U = \psi(i)$ – джерело напруги,
 $\frac{i}{U} = G(U) = \frac{f(U)}{U}$ – нелінійна провідність і т. д.

Вибирається та схема заміщення, яка найбільше узгоджується з системою зовнішніх параметрів і дає однозначну залежність між струмом і напругою елемента.

3. Вибір системи зовнішніх параметрів.

Незалежні змінні схеми – зовнішні параметри елементів (відносно них складаються рівняння схеми).

Компонентні рівняння – описують залежності між параметрами окремих елементів ($i = f(U)$, $U = \psi(i)$ і т.д.).

Топологічні рівняння – залежать від топології з’єднань і описують залежності між окремими елементами (складаються на основі законів Кірхгофа)

$$\begin{cases} \sum i = 0 - \text{I закон К} \\ \sum \varphi = 0 - \text{II закон К} \end{cases}$$

Нехай схема має “В” віток, “У” – вузлів та “К” контурів. Усього “2·В” невідомих, отже система має мати “2·В” рівнянь, причому “В” компонентних, “В” топологічних (“У-1” – за I законом К., “В-(У-1)” – за другим законом К.).

Загальна математична модель має вигляд:

$$\left. \begin{cases} I = f(U) & \text{(або } U = \psi(I)) - \text{"В" рівнянь} & \text{(компонентні)} \\ \sum I = 0 & - (Y - 1) \text{ рівняння} \\ \sum U = 0 & - B - (Y - 1) \text{ рівняння} \end{cases} \right\} \text{"В" рівнянь (топологічні)}$$

Системи незалежних змінних треба вибрати так, щоб кількість рівнянь була мінімальною. Перший крок – підстановка компонентних рівнянь у топологічні (тобто виключення струмів або напруг).

Одержуємо метод рівнянь К. для струмів:

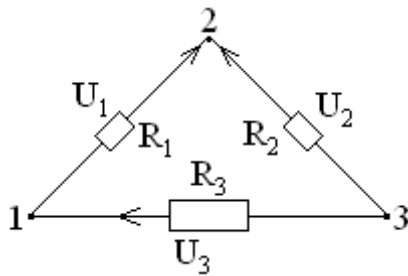
$$\begin{aligned} \sum i = 0 & - (Y - 1) \\ \sum \psi(i) = 0 & - (B - (Y - 1)) \end{aligned} \tag{15}$$

або метод рівнянь К. для напруг:

$$\begin{cases} \sum U = 0 - (B - (Y - 1)) \\ \sum f(U) = 0 - (Y - 1) \end{cases} \tag{16}$$

“В” напруг, або “В” струмів після розв’язку систем (15) або (16) визначаються з відповідних компонентних рівнянь. Другий крок – вибір таких

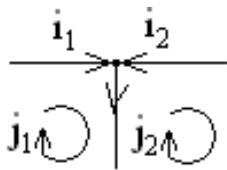
топологічних змінних, які перетворюють ряд рівнянь у тотожності. Це вузлові потенціали та контурні струми.



$$U_1 + U_2 + U_3 = 0 \Rightarrow \varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_1 - \varphi_3 = 0$$

$0=0$ – одержали тотожність.

Отже, при виборі вузлових потенціалів з системи (16) залишиться (Y-1) рівняння відносно вузлових потенціалів φ : $\sum f(\varphi) = 0$



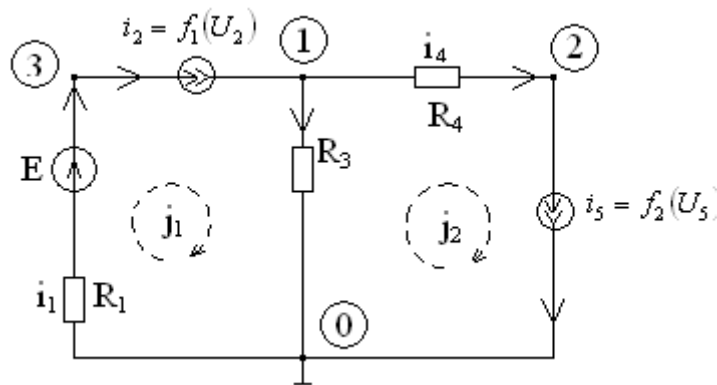
$$i_1 + i_2 - i_3 = 0 \Rightarrow j_1 - j_2 + j_2 - j_1 = 0,$$

$0=0$ – одержали тотожність

Отже, вибравши як незалежні змінні контурні струми із системи (15) залишається B-(Y-1) рівняння відносно контурних струмів j : $\sum \psi(j) = 0$.

Для зменшення кількості рівнянь зрозуміло, що при (Y-1) < B-(Y-1) застосовуємо метод вузлових потенціалів, при B-(Y-1) < (Y-1) – метод контурних струмів.

4. Складання математичної моделі схеми.



Нумеруємо всі вузли схеми. Нумеруємо всі напруги та струми. Вибираємо опорний вузол (вузол відліку). Потенціал його звичайно вважається нульовим, $\varphi=0$. Знаходимо $\psi_1(i_2)$ та $\psi_2(i_5) = f_2(U_5)$ – обернені залежності до $f_1(U_2)$ та $f_2(U_5)$. Вибираємо напрями струму в усіх вітках і вважаємо, що струм тече від більшого потенціалу до меншого. Тепер можна скласти математичну модель схеми.

Запишемо системи компонентних і топологічних рівнянь.

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = E - i_1 R_1 \\ i_2 = f_1(U_2) \\ i_3 R_3 = U_3 \\ i_4 R_4 = U_4 \\ i_5 = f_2(U_5) \\ i_1 - i_2 = 0 \\ i_2 - i_3 - i_4 = 0 \\ i_4 - i_5 = 0 \\ U_1 + U_2 + U_3 = 0 \\ U_4 + U_5 - U_3 = 0 \end{array} \right\}$$

За методом рівнянь для напруг одержимо:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{E - U_1}{R_1} - f_1(U_2) = 0 \\ f_1(U_2) - \frac{U_3}{R_3} - \frac{U_4}{R_4} = 0 \\ \frac{U_4}{R_4} - f_2(U_5) = 0 \\ U_1 + U_2 + U_3 = 0 \\ U_4 + U_5 - U_3 = 0 \end{array} \right\}$$

За методом рівнянь для струмів одержимо:

$$\left. \begin{array}{l} i_1 - i_2 = 0 \\ i_2 - i_3 - i_4 = 0 \\ i_4 - i_5 = 0 \\ E - R_1 i_1 + \psi_1(i_2) + i_3 R_3 = 0 \\ i_4 R_4 + \psi_2(i_5) - i_3 R_3 = 0 \end{array} \right\}$$

Вибравши як незалежні змінні вузлові потенціали отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(\varphi_3 - \varphi_1) - \frac{U_1}{R_3} - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_4} = 0 \quad \text{- вузол 1} \\ \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_4} - f_2(\varphi_2) = 0 \quad \text{- вузол 2} \\ \frac{\varphi_3}{R_1} - f_1(\varphi_3 - \varphi_1) = 0 \quad \text{- вузол 3} \end{array} \right.$$

Метод контурних струмів дає наступну систему:

$$\begin{cases} E - j_1 R_1 + \psi_1(j_1) + j_1 R_3 - j_2 R_3 = 0 \\ j_2 R_4 + \psi_2(j_2) - j_1 R_3 + j_2 R_3 = 0 \end{cases}$$

Топологічні рівняння схеми повинні бути лінійно незалежними – тоді розв’язок математичної моделі буде єдиним (тому маємо $(Y-1)$ рівняння за I законом К. і $B-(Y-1)$ – за II законом К.)

3.4. Основні топологічні співвідношення

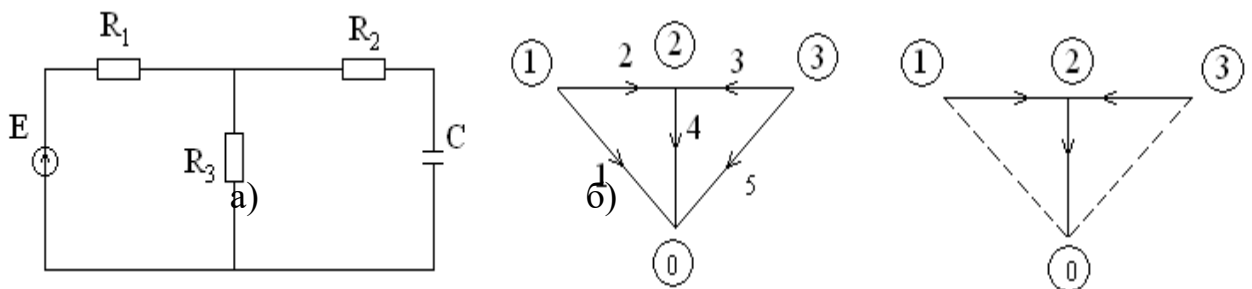


Рис.10. Схема (а), граф (б), її дерево графа (в).

Граф – сукупність відрізків довільної форми й довжини, які називаються вітками, і точок їх перетину, які називаються вершинами. Контур – довільний замкнутий шлях у графі, який не проходить двічі по одних вітках. Підграф – довільна сукупність віток і вершин графа. Дерево графа – підграф, який має всі вершини графа, але не має жодного контуру. Ребро – вітка, яка належить до дерева графа. Хорда – вітка, яка не належить до дерева графа. Доповнення дерева графа – вся сукупність хорд. Головний контур – контур, який утворюється при підключенні хорди до дерева.

Якщо у схемі “В” – віток, “У” – вузлів, то дерево графа має $(Y-1)$ – ребро. Кількість хорд тоді $B-(Y-1)$ (стільки ж головних контурів).

3.4.1. Топологічні матриці інциденцій та вузлів

Топологічна матриця схеми – запис інформації про з’єднання елементів у схемі в матричній формі (див. рис. 10)

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} \text{в} & \text{і} & \text{т} & \text{к} & \text{и} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{В} \\ \text{У} \\ \text{З} \\ \text{Л} \\ \text{И} \end{matrix} & \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} & = \hat{A} \end{matrix}$$

Рядки матриці – вузли, графа, стовпці – вітки, причому елементи матриці:

+1 – вітка входить у вузол; -1 – вітка виходить; 0 – вітка та вузол не з'єднані. Одержана матриця називається матрицею інциденцій (з'єднань), або структурною.

Матриця вузлів містить “В” стовпців та (Y-1) рядків (рядок опорного вузла викреслюємо, тоді одержиться незалежна система рівнянь). З допомогою матриці вузлів можна записати:

$$\hat{A} \cdot \bar{y} = 0 \text{ - I закон К., } \hat{A}' \cdot \varphi = -U \text{ - II закон К.}$$

4. Методи автоматичного розрахунку статичних схемотехнічних моделей електронних пристроїв

Розрахунок статичних режимів – розв’язок кінцевих рівнянь (тобто без похідних).

Мета схемотехнічного моделювання (СХМ) – визначення форми й параметрів сигналів струму й напруги, які виникають у різних точках схеми.

Вихідна система:

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \\ \dots \\ F_k(x_1, \dots, x_k) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

У загальному випадку $\vec{F}(\vec{x})=0$ $\vec{F}=(F_1, F_2, \dots, F_k)$ – вектор функція; $\vec{x}=(x_1, \dots, x_k)$ – вектор аргументів.

4.1. Прямий метод

Чисельний розв’язок системи (17) має вигляд:

$$\begin{aligned} x_1^{(n+1)} &= f_1(x_1^n, x_2^n, \dots, x_k^n) \\ x_2^{(n+1)} &= f_2(x_1^n, x_2^n, \dots, x_k^n) \\ x_k^{(n+1)} &= f_k(x_1^n, x_2^n, \dots, x_k^n) \end{aligned} \quad (18)$$

n – номер ітерації, f_1, f_2, f_k – функції, одержані з вихідної системи (17).

У загальному випадку:

$$\vec{x}^{(n+1)} = \vec{f}(\vec{x}^{(n)})$$

якщо є границя при $X_i^{(1)}, X_i^{(2)}, \dots, X_i^{(n)}$ ($i=1, 2, \dots, k$) то процес обчислень сходиться.

Особливості числових методів – $x^{(n)}$ ніколи не дорівнює x_i , тобто завжди

$$|x_i^{(n+1)} - x_i^{(n)}| \neq 0. \text{ На практиці треба досягти } \left| \frac{x_i^{(n+1)} - x_i^{(n)}}{x_i^{(n)}} < E \right| \quad (E \approx 0,01).$$

Метод простих ітерацій:

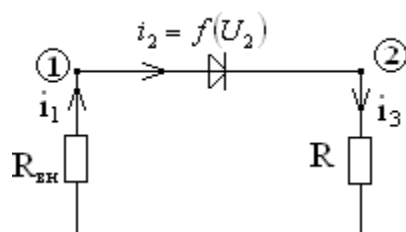
$\vec{x}^{(n+1)} = \vec{x}^{(n)} + k \cdot \vec{F}(\vec{x}^{(n)})$. У точці ξ $x^{(n+1)} = x^{(n)} = \xi$ і одержимо розв’язок вихідного рівняння $f(\xi)=0$.

Метод Ньютона. Розв’язок (18) запишеться так:

$$\begin{pmatrix} x_1^{(n+1)} \\ x_2^{(n+1)} \\ \dots \\ x_k^{(n+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^{(n)} \\ x_1^{(n)} \\ \dots \\ x_k^{(n)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{dF_1}{dx_1} \dots \frac{dF_1}{dx_k} \\ \frac{dF_2}{dx_1} \dots \frac{dF_2}{dx_k} \\ \dots \\ \frac{dF_k}{dx_1} \dots \frac{dF_k}{dx_k} \end{pmatrix}^{(n)} \times \begin{pmatrix} F_1(x_1^{(n)}, \dots, x_k^{(n)}) \\ \dots \\ F_k(x_1^{(n)}, \dots, x_k^{(n)}) \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} \text{ – для окремих рівнянь.}$$

Приклад:



$$\begin{aligned}
i_1 R_{\text{вн}} + E &= U_1 \\
i_2 &= f(U_2) \\
i_3 &= \frac{U_3}{R} \\
i_1 &= i_2 \\
i_2 &= i_3 \\
U_1 + U_2 + U_3 &= 0
\end{aligned}$$

Вибравши як незалежні змінні вузлові потенціали, одержимо вихідну систему рівнянь відносно φ_1 і φ_2 :

$$\begin{aligned}
& \text{F1} \\
& \left\{ \begin{array}{l} \overbrace{\frac{E - \varphi_1}{R_{\text{вн}}} - a(U_2 - \varphi_1) = 0} \\ \underbrace{f(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{\varphi_2}{R} = 0} \end{array} \right. , \\
& \text{F2}
\end{aligned}$$

За алгоритмом простої ітерації

$$\begin{cases} \varphi_1^{(n+1)} = \varphi_1^{(n)} + k_1 \cdot F_1^{(n)} \\ \varphi_2^{(n+1)} = \varphi_2^{(n)} + k_2 \cdot F_2^{(n)} \end{cases}$$

Алгоритм за методом Ньютона дає

$$\begin{pmatrix} \varphi_1^{(n+1)} \\ \varphi_2^{(n+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1^{(n)} \\ \varphi_2^{(n)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_{\text{вн}}} - \frac{df}{d\varphi_1} & -\frac{df}{d\varphi_2} \\ \frac{df}{d\varphi_1} & \frac{df}{d\varphi_2} + \frac{1}{R} \end{pmatrix}^{(n-1)} \times \begin{pmatrix} \frac{E - \varphi_1}{R_{\text{вн}}} & -f(\varphi_1 - \varphi_2) \\ f(\varphi_2 - \varphi_1) & \frac{\varphi_2}{R} \end{pmatrix}^{(n)}$$

Члени, залежні від φ розраховуються при $\varphi = \varphi^{(n)}$ і перераховуються на кожній ітерації.

Метод вузлових потенціалів

Вихідна модель рівняння (див. (17)) має вигляд

$$\hat{A} \cdot \vec{i}(\varphi) = 0, \tag{20}$$

де $\vec{i}(\varphi)$ – вектор вузлових струмів, тобто для кожного вузла маємо

$$\sum_{j-\text{й вузол}} i(\varphi) = 0 .$$

Тоді кожний елемент матриці Якобі

$$\frac{df_i}{df_j} = \frac{d \sum i(\varphi_i)}{d\varphi_i} = \sum \frac{di(\varphi_i)}{d\varphi_i}$$

За визначенням $G = \frac{di}{dU}$ – провідність, $U = \varphi_{\text{кінц.}} - \varphi_{\text{поч.}}$

$\frac{dU}{d\varphi_{\text{кінц.}}} = +1, \frac{dU}{d\varphi_{\text{поч.}}} = -1$. Тоді можна записати
 $\frac{di}{d\varphi} = \frac{di}{dU} \cdot \frac{dU}{d\varphi} = G \cdot \frac{dU}{d\varphi} = \pm G$, тобто $\frac{dF}{dx} = \sum G$ – сума власних ($l=j$) та взаємних ($l \neq j$) провідностей, взятих із відповідними знаками $i(\varphi) = i(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ – струм вітки або полюсний струм багатополіусника, $\sum_j i(\varphi)$ – вузловий струм j -го вузла. Отже, модель-алгоритм формується наступним чином:

$$\vec{G}(\varphi^{(k)}) \cdot \Delta \vec{\varphi}^{(k)} = -\vec{i}(\varphi^{(k)}), \quad (21)$$

де $\vec{G} = \frac{d\vec{i}}{d\vec{\varphi}}$ – матриця вузлових провідностей.

$\Delta \vec{\varphi} = \varphi^{(k+1)} - \varphi^{(k)}$ – вектор поправок. k – індекс ітерації, $\vec{i}(\varphi^{(k)})$ – вузловий струм.

Методика формування \vec{i} та \vec{G} полягає в послідовному розгляді кожного елемента та визначенні його внеску у відповідний вектор (\vec{i} та \vec{G})

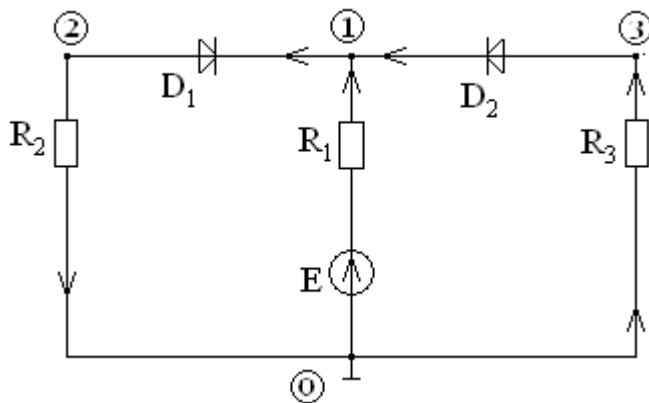
$$i \longrightarrow p \quad i = f(U) = f(\varphi_p - \varphi_j)$$

Провідність кожного двополюсника дає чотири складові:

$$G_{pp} = \frac{df(\varphi_p - \varphi_i)}{d\varphi_p}, G_{jj} = \frac{d(-f(\varphi_p - \varphi_j))}{d\varphi_j} \text{ – з додатними знаками.}$$

$$G_{ji} = \frac{df(\varphi_p - \varphi_i)}{d\varphi_j}, G_{ip} = \frac{d(-f(\varphi_p - \varphi_j))}{d\varphi_p} \text{ – з від'ємними знаками.}$$

Приклад.



Вектор вузлових потенціалів:

$$\vec{i}(\varphi) = \begin{pmatrix} i_1(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \\ i_2(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \\ i_3(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-E + \varphi_1}{R_1} - i_{D_1} + i_{D_2} \\ i_{D_1} - \frac{\varphi_2}{R_2} \\ \frac{\varphi_3}{R_3} - i_{D_2} \end{pmatrix}$$

Матриця вузлових провідностей :

$$G(\varphi) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} +\frac{1}{R_1} + G_{D_1} + G_{D_2} & -G_{D_1} & -G_{D_2} \\ -G_{D_1} & G_{D_1} + \frac{1}{R_2} & 0 \\ -G_{D_2} & 0 & \frac{1}{R_3} + G_{D_2} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \text{де } G_D = \frac{di_D}{d\varphi}$$

Врахування багатополісників при формуванні ММС.

Використовується метод позиційного сумування – до складу елементів матриці G_{ik} входять як складові елементи матриці G_{pj} n -полісника. Вектор вузлових струмів формується стандартно.

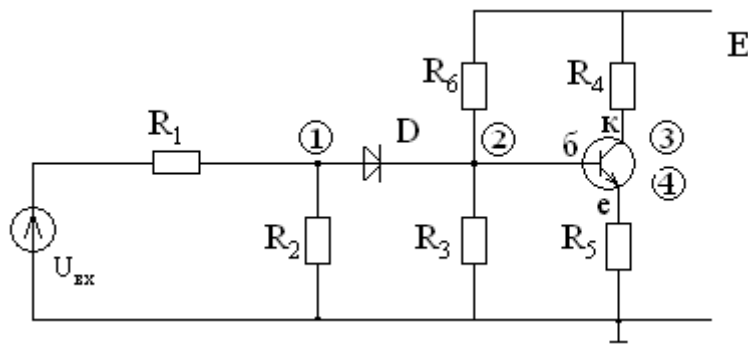
G_{pp} – власні провідності; G_{pj} – взаємні провідності n -полісника.

Приклад.

Біполярний транзистор – трьохполісник із матрицею:

$$G_{TP.} = \begin{matrix} e \\ \kappa \\ \delta \end{matrix} \begin{pmatrix} e & \kappa & \delta \\ G_{ee} & -G_{e\delta} & -G_{e\kappa} \\ -G_{\delta e} & G_{\delta\delta} & -G_{\delta\kappa} \\ -G_{\kappa e} & -G_{\kappa\delta} & G_{\kappa\kappa} \end{pmatrix}$$

Формули для G_{pj} залежать від схеми заміщення.

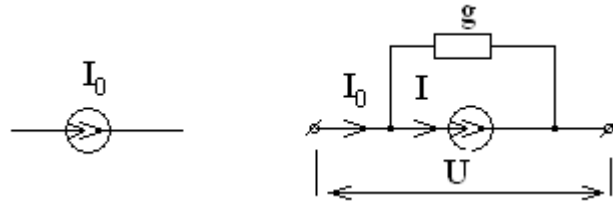


$$G(\varphi) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + G_D & -G_D & 0 & 0 \\ -G_D & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_6} + G_D + G_{\delta\delta} & -G_{\delta\kappa} & -G_{\delta e} \\ 0 & -G_{\delta\kappa} & \frac{1}{R_4} + G_{\kappa\kappa} & -G_{\kappa e} \\ 0 & -G_{\delta e} & -G_{\kappa e} & G_{ee} + \frac{1}{R_5} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

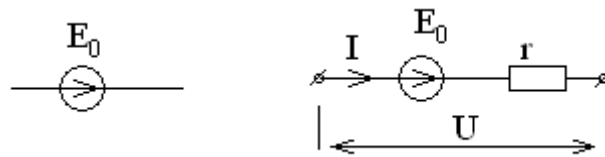
Подання елементів у базисі вузлових потенціалів

Усі рівняння елементів повинні мати вигляд: $i = f(U)$, тоді $G = \frac{di}{dU}$

Ідеальне джерело струму: $I = I_0 - g \cdot U$



Ідеальне джерело напруги: $U = E_0 - I \cdot r$, $I = \frac{E_0}{r} - \frac{U}{r}$



5. Методи автоматизованого розрахунку динамічних схемотехнічних моделей радіоелектронних пристроїв

Динамічний режим у схемі виникає під дією змінних у часі сигналів, які подаються ззовні або виробляються в самій схемі.

5.1. Явна форма моделі

$$\begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = F_1(\bar{x}, t) \\ \bar{F}_2(\bar{x}, t) = 0 \end{cases} \quad F_1 = F_1\left(\underbrace{\bar{x}}_{U_C, I_L}; \underbrace{\bar{y}}_{E, I_0}; \underbrace{\bar{w}}_{I_R, U_R}\right) \quad (22 \text{ а, б})$$

(22 а) – нормальна система звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР).

5.1.1. Методика одержання нормальної форми ЗДР

Нехай є системи компонентних та топологічних рівнянь, причому компонентними рівняннями реактивних елементів служать диференціальні залежності:

$$I_C = C * \frac{dU_C}{dt}, \quad U_L = L * \frac{dI_L}{dt}, \quad (23)$$

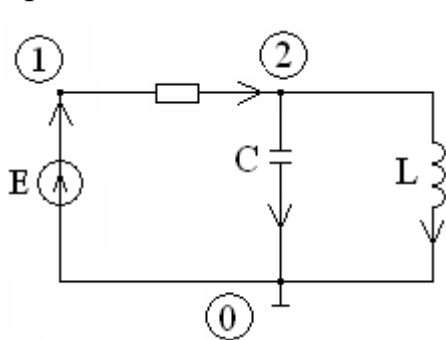
1-й етап. На основі законів Кірхгофа змінні I_C, U_L записують через струми та напруги інших віток:

$$I_C = \int_1(I_R, I_E, I_L, \dots), \quad U_L = \int_1(U_R, U_I, U_C, \dots), \quad (24)$$

2-й етап. I_C та U_L замінюються похідними, згідно з (23), законів К. та компонентних рівнянь і передаються через I_L та U_C . Одержимо нормальну систему:

$$\frac{dU_C}{dt} = \int_1(U_C, I_L, E, I_0), \quad \frac{dI_L}{dt} = \int_2(U_C, I_L, I_0, E), \quad \text{– нормальна система.}$$

Приклад.



$$\begin{cases} i_E - i_R = 0 \\ i_C + i_L + i_R = 0 \\ U_R + U_C - E = 0 \\ U_L - U_C = 0 \end{cases} \quad \text{1-етап: } i_C = i_R - I_L, \quad U_L = U_C$$

$$\text{2-й етап: } U_R = R * i_R \quad i_R = \frac{E - U_C}{R}$$

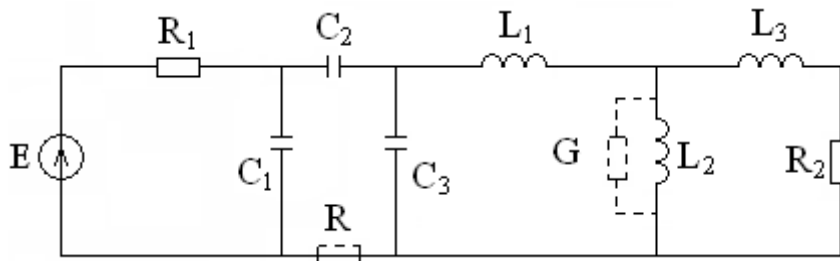
Остаточно отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{E - U_C}{R} - i_L \right) \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{U_C}{L} \end{cases}$$

Цей метод ще називається *методом змінних стану*.

Ємнісні контури та індуктивні зірки – топологічні виродження, так як одна з ємностей контуру ($\Phi = C * U_c$) або одна з індуктивностей зірки ($\Psi = L * i_L$) не може бути використана для одержання незалежного диференціального рівняння. $N = N_C + N_L - N_T$ – порядок нормальної системи, де N_T – кількість топологічних вироджень.

Приклад.



$$N = 4$$

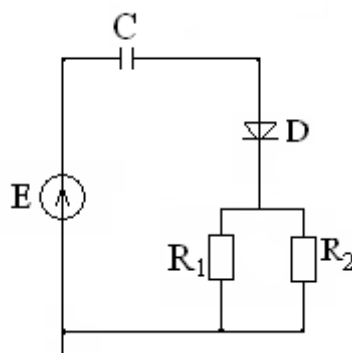
Виродження усувається під'єднанням до ємнісного контуру малого опору R або паралельно до індуктивності – малої провідності G . Розрахунки ускладнюються, оскільки потрібно розв'язати ще рівняння на зразок (22 б).

5.1.2. Організація розрахунку моделі схеми в явній формі

(22 а) та (22 б) розраховуються довільними числовими методами. Організація розрахунку (22 а,б) полягає в почерговому розв'язку системи (22 а) та (22 б). Нехай зі статичного режиму відомі U_{C0} , i_{L0} та ω_0 . Тоді:

- 1) підставляючи U_{C0} , i_{L0} та ω_0 в (22 а) і розв'язуючи її будь-яким чисельним методом, визначаємо U_{C1} та i_{L1} ,
- 2) вважаючи U_{C1} та i_{L1} , постійними джерелами струму та напруги розраховуємо квазістатичний режим, тобто (22 б) і визначаємо $\omega_1 = \omega(t_1)$. Потім знову переходимо до п.1.

Приклад.



$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{E - U_c - U_D}{R_1} + \frac{E - U_c - U_D}{R_2} \right) \\ I_0 \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot \varphi_T}} - 1 \right) - \frac{U_{R1}}{R_1} - \frac{U_{R2}}{R_2} = 0 \\ E - U_c - U_D - U_{R1} = 0 \\ E - U_c - U_D - U_{R1} = 0 \end{cases} \quad (\text{а,б})$$

Нехай відомі U_{c0}, U_{D0} . Тоді з (а) знайдемо U_{c1} . Підставимо U_{c1} в рівняння (б) і знайдемо $U_{D1}, U_{R1}(t_1), U_{R2}(t_2)$. Маючи U_{c1} та U_{D1} , можемо знову розв'язати (а) відносно U_{c2} і т.д.

Основні числові методи розв'язку системи ЗДР

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), \quad x(t_0) = x_0 \quad - \text{початкова умова.} \quad (25)$$

У результаті розв'язку одержимо: $x(t_1) = x_1, x(t_2) = x_2, \dots$

$$x_{n+1} = x_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(x, t) dt \quad (26)$$

Найпростішим методом розв'язування (26) є узагальнений двоточковий метод:

$$h = \Delta t, \quad x_{n+1} = x_n + h[a * f(x_n, t_n) + (1-a) * f(x_{n+1}, t_{n+1})] \quad (27)$$

При $a=1$ – явний метод Ейлера:

$$x_{n+1} = x_n + h * f(x_n, t_n)$$

При $a=0$ – неявний метод Ейлера:

$$x_{n+1} = x_n + h * f(x_{n+1}, t_{n+1})$$

При $a = \frac{1}{2}$ – метод трапецій:

$$I_k = \frac{C \cdot \Delta U_c}{\Delta t} = \frac{C \cdot (U_k - U_{k-1})}{\Delta t}$$

Приклад.

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{E - U_c}{R * C}, \quad \text{Нехай } E = R = C = 1$$

Тоді явний метод: $U_{c,n+1} = U_{c,n} + h(1 - U_{c,n})$,

$$\text{У неявному методі: } U_{c,n+1} = U_{c,n} + h(1 - U_{c,n+1}) \Rightarrow U_{c,n+1} = \frac{U_{c,n} + h}{1 + h}$$

Неявний метод дуже стійкий, явний має обмеження на крок інтегрування ($h \leq T_{\min}$).

5.2. Неявна форма математичної моделі

У загальному випадку маємо:

$$F\left(\frac{dx}{dt}, \int x dt, x(t)\right) = 0, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (28)$$

Використаємо кінцево-різницеві апроксимації (дискретизація).

$$\frac{dx}{dt} = f_g(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}), \quad \int_a^b x dt = f_i(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}) \quad (29)$$

Отже, від системи (28) переходимо до системи кінцево-різницевих алгебраїчних рівнянь:

$$F_i(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}) = 0 \quad (30)$$

Операції (29) – дискретизація. Підстановка (29) в (28) і одержання (30) – алгебраїзація.

Дискретизація і алгебраїзація – суть побудови моделі в неявній формі.

Одержана модель (30) розв'язується відносно x_{n+1} довільним числовим методом (наприклад методом Ньютона):

$$F' \left(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k} \right) * \Delta x_{n+1} = -F \left(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k} \right) \quad (31)$$

$\Delta x_{n+1} = x_{n+1} - x_{n+1}^k$, \bar{X} - матриця Якобі. Процес повторюємо, поки не пройдемо весь інтервал А.

Особливості неявної форми моделі схеми

1. Немає числового методу розв'язку (типу (26))

2. Система (28) – змішана ($\frac{dx}{dt}$, $\int x dt$, і т. д.)

3. Система (28) не накладає обмежень на тип змінних (φ, j, u).

5.2.1. Розрахунок неявної форми моделі схеми в базисі вузлових потенціалів.

Рівняння компонентів повинні мати вигляд $i = f(U)$, тобто

$$i_c = C * \frac{dU_c}{dt}, \quad i_L = \frac{1}{L} \int U_L dt \quad (32)$$

Здійснивши операції дискретизації (в неявному методі) формул (32) (див. розділ 3.1. та рис.(3-4)), одержимо:

$$i_{c,n+1} = \frac{c}{\Delta t} * U_{c,n+1} - \frac{c}{\Delta t} * U_{c,u}$$

$$i_{L,n+1} = \frac{\Delta t}{L} * U_{L,n+1} + i_{L,u}$$

У загальному випадку ці формули мають вигляд:

$$\begin{cases} i_{c,u+1} = \frac{c}{\Delta t} * U_{c,n+1} + f(U_{c,n}, U_{c,n-1}, \dots, U_{c,u-k}) = g_c * U_{c,u+1} + I_c \\ i_{L,u+1} = \frac{\Delta t}{L} * U_{L,u+1} + f(i_{L,u}, i_{L,u-1}, \dots, i_{L,u-k}) = g_L * U_{L,u+1} + I_L \end{cases} \quad (33)$$

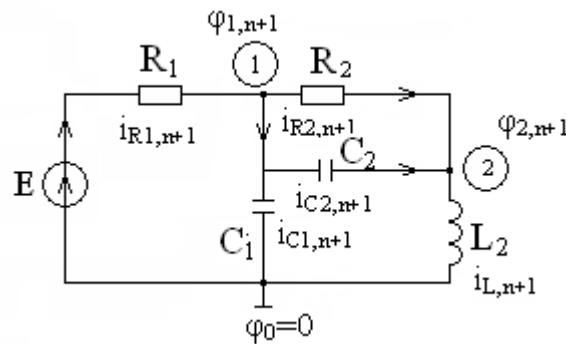
У базисі вузлових потенціалів теоретична модель схеми для алгоритму (31) має вигляд:

$$G \left(\varphi_{n+1} \right) * \Delta \varphi_{n+1} = -I \left(\varphi_{u+1}, \varphi_u, \dots, \varphi_{u-k} \right) \quad (34)$$

При формуванні вектора струмів в (34) кожне з рівнянь для i (33) розглядається як рівняння струму відповідної вітки. При цьому $U_{C,U+1}, U_{L,U+1}$ Замінюємо через різниці потенціалів, а $U_U, U_{U-1} \dots$ вважаємо відомими. При формуванні матриці вузлових провідностей G внесок ємнісної вітки дорівнює $g_c = \frac{c}{\Delta t}$, індуктивної – $g_L = \frac{\Delta t}{L}$ з відповідними знаками.

Таким чином, у базисі вузлових потенціалів формування моделі схеми (34) для розрахунку перехідних процесів не відрізняється від формування моделі (21) для розрахунку статичних режимів.

Приклад.



$$U_{1,U+1} = E - i_{R1,U+1} * R_1, \quad U_{1,U+1} = \varphi_{1,U+1}$$

$$i_{R1,U+1} = \frac{E - \varphi_{1,U+1}}{R_1}; \quad i_{R2,U+1} = \frac{\varphi_{2,n+1} - \varphi_{1,U+1}}{R_2}$$

$$i_{C1,U+1} = C1 \frac{U_{C1,n+1} - U_{C1,n}}{\Delta t} = C1 \frac{-\varphi_{1,n+1} - U_{C1,n}}{\Delta t};$$

$$i_{C2,U+1} = C2 \frac{U_{C2,n+1} - U_{C2,n}}{\Delta t} = C2 \frac{(\varphi_{2,n+1} - \varphi_{1,n+1}) - U_{C2,n}}{\Delta t}$$

$$i_{L,U+1} = i_{L,n} + \frac{\Delta t}{L} U_{L,n+1} = i_{L,n} + \frac{\Delta t}{L} (-\varphi_{2,n+1})$$

Матриця вузлових струмів має вигляд

$$I(\varphi) = \begin{pmatrix} i_{R1,n+1} - i_{C1,n+1} - i_{C2,n+1} - i_{R2,n+1} \\ i_{R2,n+1} + i_{C2,n+1} - i_{L,n+1} \end{pmatrix}$$

Матриця вузлових провідностей має вигляд

$$G(\varphi) = \left(\begin{array}{c} \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{C1}{\Delta t} + \frac{C2}{\Delta t} - \frac{C2}{\Delta t} - \frac{1}{R2} \\ -\frac{C2}{\Delta t} - \frac{1}{R2} \qquad \qquad \qquad \frac{1}{R2} + \frac{C2}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{L} \end{array} \right)$$

5.3. Моделювання частотних характеристик

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ): $F(j\omega) = \frac{U_{вих}(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)}$

Способи розрахунку АЧХ:

1. Аналітичний: $F(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}$, де M,N – многочлени;
2. Моделювання АЧХ на ЕОМ. При цьому є символний підхід (коефіцієнт многочленів у вигляді формул) та чисельний підхід (розраховуються чисельні значення $F(j\omega)$ при різних ω).

Метод вузлових потенціалів дозволяє формувати вузлові рівняння і для частотної області. Методика та ж сама, змінюються лише компонентні рівняння реактивних віток, а саме:

$$i_c = j\omega c(\varphi_{кінц.} - \varphi_{поч.}) , \qquad i_L = \frac{j}{\omega L}(\varphi_{кінц.} - \varphi_{поч.}) \qquad (35)$$

Відповідно провідності реактивних віток дорівнюють

$$y_c = j\omega c , \qquad y_L = -\frac{j}{\omega L} \qquad (36)$$

Формула (35) використовується при формуванні вектора вузлових струмів, а (36) – при формуванні матриці вузлових провідностей. У схемі заміщення джерела напруги E закорочуються, а джерела струму I – розмикаються. Одержимо вузлове рівняння лінійної схеми в частотній області:

$$G(j\omega) * \varphi(j\omega) = -I(j\omega) \qquad (37)$$

Рівняння (37) на кожній частоті треба розв’язувати тільки один раз (на відміну від (34)).

Підставляючи в (37) різні ω_i і вираховуючи $\varphi(j\omega_i)$, одержимо комплексну частотну характеристику РЕП.

Якщо треба розрахувати характеристику в k-му вузлі схеми, на кожній ω_i треба вибрати з вектора $\vec{\varphi}(j\omega_i)$ комплексне значення потенціалу $\varphi_k(j\omega_i) = A_k(\omega_i) + (j * B_k(\omega_i))$ і розрахувати АЧХ і ФЧХ у вузлі “k” за формулами

$$\varphi_{к.АЧХ}(\omega_i) = \sqrt{A_k^2(\omega_i) + B_k^2(\omega_i)}, \qquad \varphi_{к.ФЧХ}(\omega_i) = \arctg \left[\frac{B_k}{A_k} \right] \qquad (38)$$

6. Методи автоматизованого проектування РЕП на функціональному рівні

Суть функціонального проектування – розбиття РЕП на окремі функціональні блоки, кожний із яких виконує те чи інше функціональне перетворення сигналу (підсилення, обмеження і т.д.) і розрахунок форми сигналу та його основних параметрів у кожній точці одержаної функціональної схеми.

Форма сигналу:

$f = x(t)$ – моделювання в часовій області,

$f = x(j\omega)$ – моделювання в частотній області.

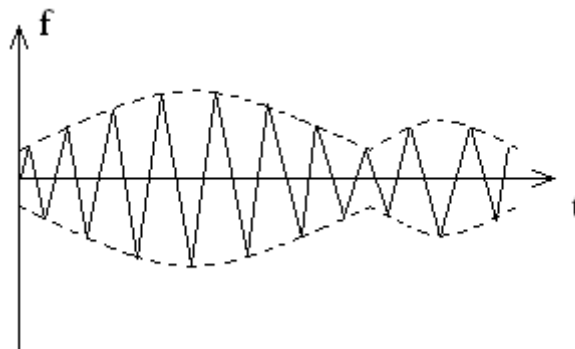
Основна вимога: висока швидкість моделювання (велика кількість варіантів).

Допущення при функціональному моделюванні (ФМ):

1. Розв'язка окремих блоків ФС ($R_{вх} = \infty, R_{вих} = 0$).
2. Однонаправленість елементів ($f_{вих}$ не впливає на $f_{вх}$).

Приклад ФМ

f_1, f_2, \dots, f_4 - схемотехнічне моделювання, $f_{модуляц.}$ - функціональне моделювання.



6.1. Базові елементи функціональних схем

6.1.1. Генератори сигналів



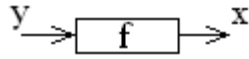
Моделювання генераторів – розрахунок відомої функції $x(t)$ в момент t_n .

Неперервну функцію $x(t)$ треба замінити дискретною $x_n = x(t_n)$. Для економії часу x_n замінюється на $x_n = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots)$.

Приклад $x(t) = k * e^{at}$,

$$x_n = x(t_n) = k * e^{at_n} = k * e^{a(t_{n-1} + \Delta t)} = k * e^{a \Delta t} * e^{a t_{n-1}} = A * x_{n-1} \Rightarrow x_n = A * x_{n-1}, x_0 = k.$$

6.1.2. Безінерційні елементи



$y=f(x)$ – функція перетворення (лінійна або

нелінійна). Моделювання безінерційних статичних елементів – $y=f(x)$ у довільний момент часу. Характеристика – функція f , яка ставить у відповідність числу число.

Моделювання безінерційних динамічних елементів - $y = f(x, \Delta t)$, тобто “у” можна вирахувати тільки через Δt . Якщо $x = x_{i(t)}$, то $y = y_{i(t)}$, тобто $x(t)$ на інтервалі $t_2 - t_1 = \Delta t$ аналізується на відповідність $x_i(t)$. Оскільки $y_i(t)$ діє з моменту t_1 , то затримки немає і елемент безінерційний.

Характеристика елемента – оператор, який ставить у відповідність функції функцію або функціонал, який ставить у відповідність функції число.

6.1.3. Інерційні лінійні елементи

$$y(t) \rightarrow \boxed{h(t)} \rightarrow x(t) \quad y(t) = \int_0^t x(\tau) * h(t - \tau) d\tau \quad \text{– функція перетворення в часовій}$$

області.

$$y(j\omega) \rightarrow \boxed{K(j\omega)} \rightarrow x(j\omega) \quad y(j\omega) = k(j\omega) * x(j\omega) \quad \text{– функція перетворення в частотній}$$

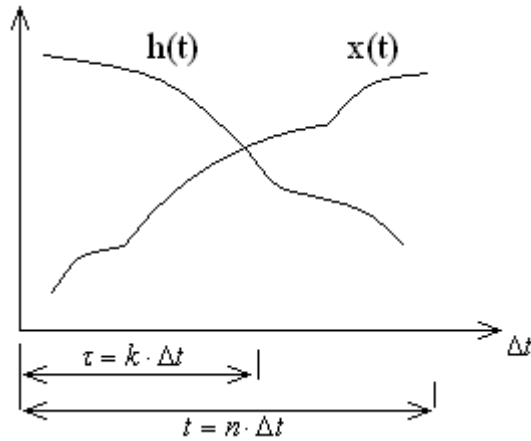
області.

(39)

Способи задання інерційних лінійних елементів – перехідна характеристика $h(t)$, коефіцієнт передачі $k(j\omega)$. Области моделювання – часова – $x(t)$, частотна – $x(j\omega)$.

Моделювання елементів, заданих $h(t)$, в часовій області – шляхом чисельного розрахунку вихідного інтеграла згортки.

Використовується метод ковзаючого підсумовування:



$$t - \tau = (n - k) \cdot \Delta t .$$

$$t = n \Delta t, \tau = k \Delta t, t - \tau = (n - k) \Delta t$$

В інтервалі Δt $x(t)$ та $h(t - \tau) = \text{const}$

тоді

$$y_n = \sum_{k=0}^n x(k \cdot \Delta t) * h[(n - k) \Delta t] * \Delta t = \Delta t * \sum_{k=0}^n x_k * h_{n-k} \quad (40)$$

Таким чином, розрахунок вхідного сигналу y_{n-1}, y_n, \dots в моменти t_{n-1}, t_n, \dots полягає в обчисленні сум типу: $y_n = \Delta t * (x_0 * h_n + x_1 * h_{n-1} + \dots + x_n * h_0)$ методом ковзаючого підсумовування значень x_k з ковзаючою вагою h_{n-k} .

Моделювання елементів, заданих $K(j\omega)$, в частотній області:

треба вхідний сигнал $X(j\omega)$, коефіцієнт передачі $K(j\omega)$ та вихідний сигнал $Y(j\omega)$ представити комплексними числами в алгебраїчній або показниковій формі.

Алгебраїчна форма:

$$X(j\omega) = X_1(\omega) + j * X_2(\omega), \quad K(j\omega) = K_1(\omega) + j * K_2(\omega), \quad Y(j\omega) = Y_1(\omega) + j * Y_2(\omega),$$

оскільки $Y(j\omega) = K(j\omega) * X(j\omega)$, то одержимо $Y_1(\omega) = X_1(\omega) * K_1(\omega) - X_2(\omega) * K_2(\omega)$,

$$Y_2(\omega) = X_1(\omega) * K_2(\omega) - X_2(\omega) * K_1(\omega).$$

Показникова форма:

$$X(j\omega) = X(\omega) + \exp(j * \varphi_x(\omega)), \quad K(j\omega) = K(\omega) + \exp(j * \varphi_k(\omega)), \quad \text{і тоді}$$

$$Y(j\omega) = K(\omega) * X(\omega) * \exp[j(\varphi_k(\omega) + \varphi_x(\omega))], \quad \text{при цьому } K(\omega) = \sqrt{K_1^2(\omega) + K_2^2(\omega)},$$

$\varphi_{K(\omega)} = \arctg \left[\frac{K_2}{K_1} \right]$ (аналогічно для $X(\omega)$ і $\varphi(\omega)$). Зрозуміло, що замість $Y(j\omega)$ розраховується $Y(\omega) = K(\omega) * X(\omega)$ та $\varphi_y(\omega) = \varphi_k(\omega) + \varphi_x(\omega)$. Перехід від показникової форми до алгебраїчної: $K_1(\omega) = K(\omega) * \cos \varphi_k$, $K_2(\omega) = K(\omega) * \sin \varphi_k$.

Аналогічні співвідношення можна використовувати при заданні замість $K(j\omega)$ операторного коефіцієнта передачі $K(P)$.

6.1.4. Інерційні нелінійні елементи

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} \text{x(t)} \\ \rightarrow \end{array} \rightarrow \boxed{A(x)} \rightarrow \begin{array}{c} \text{y(t)} \\ \rightarrow \end{array} & \begin{array}{c} \text{x(t)} \\ \rightarrow \end{array} \rightarrow \boxed{h(t)} \rightarrow \boxed{f} \rightarrow \begin{array}{c} \text{y(t)} \\ \rightarrow \end{array} & \text{y(t)} = f \left(\int_0^t x(\tau) * h(t-\tau) d\tau \right) \quad (41) \\
 & \begin{array}{c} \text{x(t)} \\ \rightarrow \end{array} \rightarrow \boxed{f} \rightarrow \boxed{h(t)} \rightarrow \begin{array}{c} \text{y(t)} \\ \rightarrow \end{array} & \text{y(t)} = \int_0^t f(x(\tau)) * h(t-\tau) d\tau
 \end{array}$$

(41) – еквівалентні зображення інерційного нелінійного елемента.

Функція перетворення – нелінійний оператор $A(x)$ (ЗДР), який ставить у відповідність кожній вхідній реалізації $x(t)$ вихідну реалізацію $y(t)$:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} + g_i(y(t)) = \frac{dx_i(t)}{dt} + f_i(x(t)), \quad i = \overline{1, n} \quad (42)$$

У загальному випадку:

$$F_i(y^{(k)}, y^{(k-1)}, \dots, y, t) = \Phi_i(x^{(p)}, x^{(p-1)}, \dots, x, t) \quad (43)$$

k, p – номер похідних.

Рівняння (41) використовується, якщо диференціальними рівняння скласти важко.

Способи моделювання нелінійних інерційних елементів:

1. Зображення нелінійного елемента спрощеною схемою заміщення або спрощеною функцією нелінійного перетворення.

2. Опис елемента диференціальними рівняннями типу (42-43) і потім чисельні розв'язки їх на основі дискретизації та алгебраїзації.

$$\frac{dy}{dt} \sum_{i=n-k}^{n+1} \alpha_i * y_i \quad \text{– дискретизація, після якої ЗДР (42) перетворюється в}$$

алгебраїчне рівняння відносно y_{n+1} :

$$\sum_{i=n-k}^n \alpha_i * y_i + \alpha_{n+1} * y_{n+1} + g(y_p) = \sum_{i=n-k}^{n+1} p_i x_i + f(x_p), p = n \text{ або } n+1.$$

Явний метод – y' , $g(y_p)$, x' , $f(x_p)$ розраховуються в точці $t = t_n$ ($p = n$) або в попередніх точках t_{n+1-k} ($k = 1, 2, \dots$).

Тоді одержимо явне рівняння відносно y_{n+1} :

$$y_{n+1} = \frac{1}{\alpha_{n+1}} * \left[\sum_{i=n-k}^{n+1} \beta_i - x_i + f(x_n) - \sum_{i=n-k}^n \alpha_i * y_i - g(y_n) \right] \quad (44)$$

Неявний метод – дискретизовані функції y' , x' та $g(y_p)$, $f(x_p)$ розраховуються в точці t_{n+1} ($p = n+1$). Тоді можна записати:

$$\alpha_{n+1} * y_{n+1} + \sum_{i=n-k}^n \alpha_i * y_i + g(y_{n+1}) = \sum_{i=n-k}^{n+1} p_i x_i + f(x_{n+1}) \quad (45)$$

одержали неявне рівняння відносно y_{n+1} .

Аналогічно моделюються елементи РЕП з інтервальними залежностями та рівняння в частинних похідних.

6.2. Алгоритм моделювання типових структур ФС

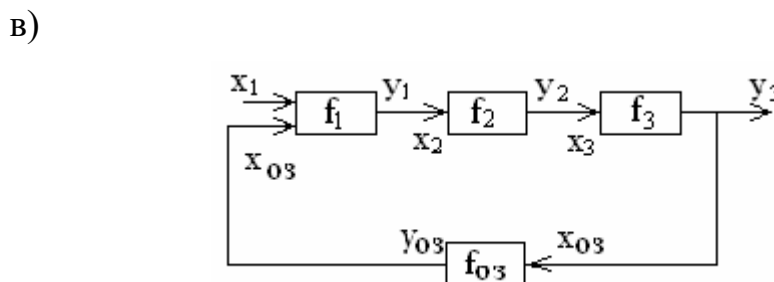
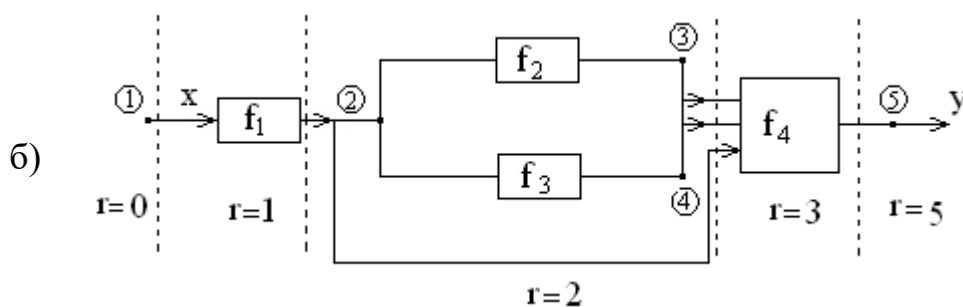
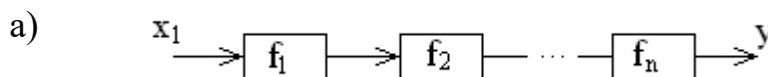


Рис.11. Основні типи структур ФС: а) проста послідовна структура; б) складна послідовна структура; в) структура з оберненим зв'язком.

Ранжирування схеми – розташування її елементів так, щоб входами елементів r -го рангу ($r = i, i = 0, 1, 2, \dots$) були виходи елементів тільки меншого рангу ($r = i - k, k = 1, 2, \dots$).

Підходи до моделювання ФС:

1. Формальний підхід – ФС розглядається як ненаправлена структура з компонентними та топологічними рівняннями. Потім використовуємо алгоритми.

2. Причинно-наслідковий (імітаційний) підхід – враховуються особливості ФС, тобто спочатку вираховуємо причини (вхідні сигнали), потім наслідки (вихідні сигнали).

6.2.1. Алгоритми розрахунку безінерційних ФС

Для структур типу (рис. 11а) маємо суперпозицію:

$$y_n = f(f_{n-1}(\dots(f_2(f_1(x)))))) \quad (46)$$

Розглянемо структуру типу (рис.11в). Згідно з формальним підходом можна записати систему з компонентних та топологічних рівнянь:

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, x_{oz}) \\ y_2 = f_2(x_2) \\ y_3 = f_3(x_3) \\ y_{oz} = f_{oz}(x_{oz}) \end{cases} \begin{cases} x_2 = y_1 \\ x_3 = y_2 \\ x_{oz} = y_3 \\ y_{oz}^* = y_{oz} \end{cases}, \text{ або в неявній формі } \begin{cases} y_1 - f_1 = 0 \\ y_2 - f_2 = 0 \\ y_3 - f_3 = 0 \\ y_{oz} - f_{oz} = 0 \end{cases} \begin{cases} x_2 - y_1 = 0 \\ x_3 - y_2 = 0 \\ x_{oz} - y_3 = 0 \\ y_{oz}^* - y_{oz} = 0 \end{cases} \quad (47)$$

Системи типу (47) вже можна розв'язувати довільними числовими методами (напр. методом Ньютона). Перевага даного підходу полягає в тому, що можна автоматизувати ФМ без ранжирування схеми (використовувати програми схемотехнічного проектування).

При причинно-наслідковому підході треба послідовно підставляти компонентні рівняння в топологічні й одержати одне рівняння відносної довільної змінної в оберненому зв'язку:

$$y_1 - f_1(x_1, f_{oz}(f_3(f_2(y_1)))) = 0 \quad (48)$$

Визначивши одну змінну з рівнянь типу (48) з допомогою (47) визначаємо всі інші невідомі.

(48) розв'язуємо чисельними методами (напр. простими ітераціями):

$$y_1^{(k+1)} = f_1(\dots(y_1^{(k)})) \quad (49)$$

Для забезпечення збіжності (49) використовуються рівняння типу:

$$y_1^{(k+1)} = y_1^{(k)} - \lambda * (y_1^{(k)} - f_1(\dots(y_1^{(k-1)}))) \quad (50)$$

Отже, при ФМ на основі причинно-наслідкового підходу кожна петля оберненого зв'язку породжує одне рівняння вигляду $x = f(x)$. Якщо елементи лінійні ($y_i = k * x_i$), то рівняння розв'язуються чисельними методами.

6.2.2. Розрахунок статичних часових діаграм

Статичні часові діаграми (СЧД) – залежність $y(t)$ на виході та $y(t)$ у внутрішніх точках схеми за умови, що $x(t)$ змінюється настільки повільно, що ФС можна вважати безінерційною. Розрахунок СЧД виявляє помилки структурного типу. Існує два способи розрахунку СЧД :

1. Спосіб миттєвого сигналу – при t_i розраховуємо $y_1(t_i), y_2(t_i), \dots, y_n(t_i)$ для всіх точок ФС на основі вищенаведених алгоритмів, потім повторюємо для t_{i+1} і т. д.

У цьому випадку може використовуватись як формальний, так і причинно-наслідковий підходи.

2. Спосіб послідовного повного сигналу (ППС) – здійснюється розрахунок всіх значень $y_1(t_1), y_1(t_2), \dots, y_1(t_k)$, потім на основі цього - $y_2(t_1), y_2(t_2), \dots, y_2(t_k), \dots$, і т. д.

Повний сигнал – множина всіх значень сигналу на вході або на виході елемента.

Особливості застосування методу ППС в ФС з оберненими зв'язками (рис. 11в):

1. Коло оберненого зв'язку розмикається, і повний сигнал розраховується на виході розімкнутого кола оберненого зв'язку (ex_{oz}^*) за умови, що на вході діє тільки x_1 . 2. Знову розраховуємо повний сигнал x_{oz}^* , але

з умовою, що на вході діє не тільки x_1 , але й розрахований раніше x_{oz}^* . Процес повторюється до $\|x_j^{(i+)}(t) - x_j^{(i)}(t)\| \leq \varepsilon$, “ i ” – номер ітерації, $x_j(t)$ - повний сигнал в j -тій точці схеми. $x_{oz}^{*(i+)} = f_{oz}(x_1(t), x_{oz}^{*(i)}(t))$.

6.3. Алгоритми розрахунку перехідних процесів

Якщо швидкість реакції інерційних елементів можна порівняти зі швидкістю зміни вхідного сигналу, то в ФС виникнуть перехідні процеси. Можливі три типових випадки:

1. Інерційні елементи (ІЕ) лінійні і мають перехідні характеристики $h_i(t)$.

Алгоритми ФС без обернених зв'язків зводяться до послідовного обчислення миттєвого або повного сигналу на виході кожного ІЕ за формулами типу (46). Якщо є обернений зв'язок, то виникає ітеративний алгоритм типу (49). Отже, алгоритми розрахунку перехідних процесів у цьому випадку не відрізняються від розрахунку СЧД (тільки інші компонентні рівняння).

2. Інерційні елементи лінійні й задані коефіцієнтами передачі $K(j\omega)$. Для ФС з послідовною структурою

$$K_{заг.}(j\omega) = \prod_{i=1}^n K_i(j\omega), \text{ де } n - \text{кількість елементів ФС.}$$

Для ФС з “ n ” паралельно під'єднаними елементами $K_i(j\omega)$ для сумарного сигналу на виході маємо

$$K_{заг.}(j\omega) = \sum_{i=1}^n K_i(j\omega).$$

Якщо ФС має коло з оберненим зв'язком $K_{oz}(j\omega)$, яке охоплює “ n ” послідовних елементів, то тоді

$$K_{заг.}(j\omega) = \frac{\prod_{i=1}^n K_i(j\omega)}{\left(1 + K_{oz} * \prod_{i=1}^n K_i(j\omega)\right)}.$$

3. Інерційні елементи представлені диференціальними рівняннями

При явному способі розв'язку y_{n+1} явно виражається через $x_{n+1}, x_n, \dots, y_n, y_{n-1}, \dots$. Це фактично безінерційний елемент у момент t_{n+1} (обов'язково має бути початкова умова).

При неявному способі формулу (45) запишемо так:

$$y_{i,n+1} = f_i(\alpha_i * y_{i,n+1}; y_{i,n}; x_{n+1}), \quad (51)$$

де i – номер елемента, $n-t=t_n$, α – коефіцієнт, який залежить від вибору чисельного методу. Тепер (51) розв'язується або методом ППС, або методом миттєвого сигналу.

Крім того, формулі (51) можна поставити у відповідність структуру з оберненими зв'язками (рис. 11в), в якій елемент оберненого зв'язку “ α ” характеризує ступінь неявності методу.

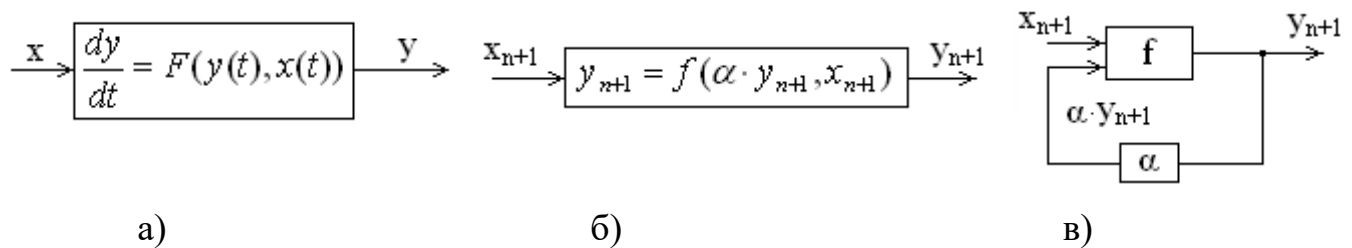


Рис. 12. Розрахунок інерційних елементів: а) інерційний елемент (ІЕ); б) дискретизоване зображення ІЕ для неявного методу; в) безінерційна структура, яка відповідає розрахунку ІЕ неявним методом.

Наведений обернений зв'язок називається *розрахунковим* (виникає тільки в цьому методі). Отже, розрахунок ланцюга ІЕ неявним методом розв'язку диференціальних рівнянь еквівалентний розрахунку безінерційних структур із оберненим зв'язком (рис. 12) за відомими алгоритмами (див. розділ 6.2.1.)

У загальному випадку розрахунок ФС треба виконувати формальними методами, складаючи підсистеми топологічних рівнянь ($x_i - y_j = 0$) та підсистеми компонентних рівнянь ($F(x', y', x, y) = 0$, а після дискретизації $F(x_{n+1}, x_n, \dots, y_{n+1}, y_n, \dots) = 0$).

Загальна система для кожного $t = t_{n+1}$ має вигляд

$$\Phi(x_{n+1}, y_{n+1}) = 0.$$

Розв'язок починається в нульовій точці (x_0, y_0) і повторюється в кожній наступній точці до збіжності в її околі.

7. Методи автоматизованого проектування РЕП на структурному рівні

Об'єкт проектування – структурна схема, тобто сукупність взаємно зв'язаних завершених великих блоків. Фізичні канали зв'язку розглядаються як окремі блоки з відповідними параметрами, а графічні зв'язки вважаються ідеальними каналами зв'язку.

Вихідні дані при структурному проектуванні:

1. Параметри окремих блоків (надійність, точність, час спрацювання і т. д.);
2. Вихідні параметри всієї схеми (вартість, продуктивність і т. д.).

Завдання проектування структурної схеми – використовуючи типи, зв'язки блоків, знайти таку структуру, яка мала би задані вихідні параметри й характеристики.

Методи аналізу структурної схеми:

1. Аналітичне моделювання – робота кожного блока описується аналітичним виразом.

Якщо t – час роботи системи, $f(t)$ – густина розподілу відмови, то ймовірність відмови блока Q за час t дорівнює

$$Q(t) = \int_0^t f(t) * dt.$$

Для паралельних блоків – $\Phi_{\text{парал.}} = Q_1(t) * Q_2(t)$,

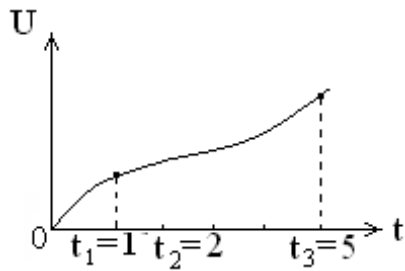
для послідовних – $\Phi_{\text{послід.}} = Q_1(t) + Q_2(t) - Q_1(t) * Q_2(t)$.

Аналітичні методи використовуються в основному для безінерційних систем, оскільки потрібно створювати спрощуючі передумови.

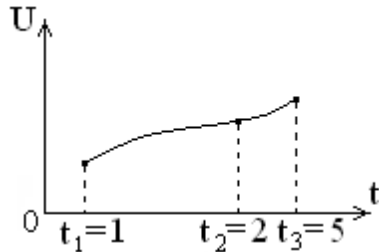
2. Імітаційне моделювання – часова послідовність подій у моделі та реальному пристрої однакова.

Процес імітаційного моделювання полягає в:

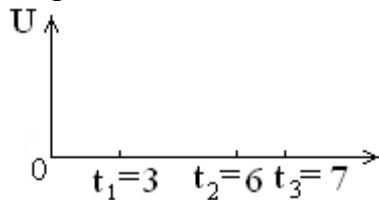
- моделюванні проходження сигналу через систему,
- визначення стану кожного з блоків і системи в цілому,
- розрахунок помилок і перешкод при проходженні сигналу.



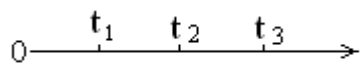
Реальний час – в ньому протікають процеси в реальному пристрої.



Системний (модельний) час – абстрактний час, в якому протікають процеси при їх моделюванні на ЕОМ.



Машинний час – реальний час моделювання на ЕОМ.

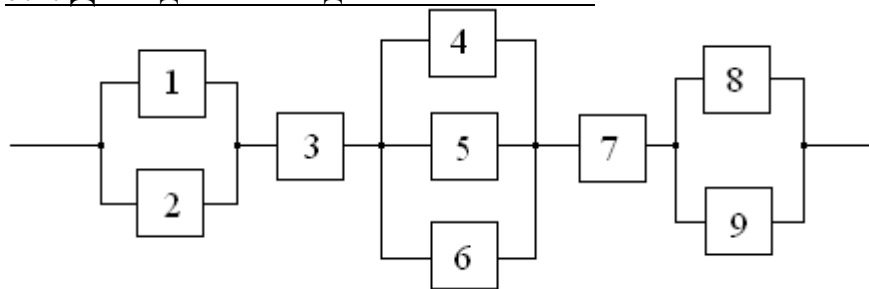


Автоматний час – абстрактний час, який тільки реєструє події незалежно від їх тривалості.

Рис. 13. Зображення окремих моментів реального процесу проектування в різних типах часу.

Робота системи аналізується шляхом багаторазового розрахунку реакції системи на випадкові зовнішні впливи або випадкові варіації параметрів її пристроїв. Статистична обробка результатів дає можливість виконати корекцію схеми та моделі.

7.1. Дослідження надійності системи



Робота кожного блока описується оператором

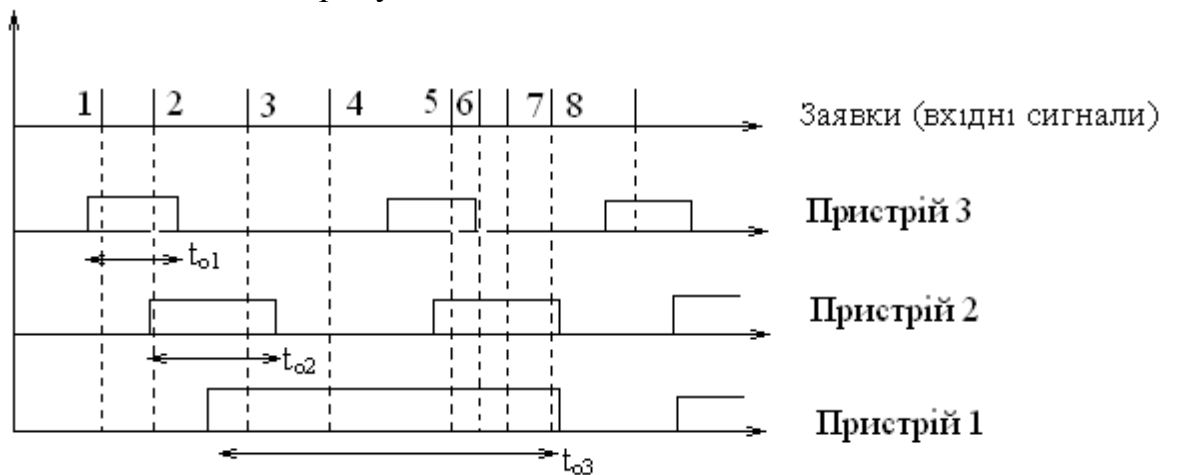
$$\eta_i(t) = \begin{cases} 1 - \text{в момент } t \text{ } i\text{-ий блок справний,} \\ 0 - \text{в момент } t \text{ } i\text{-ий блок несправний.} \end{cases}$$

Послідовне з'єднання блоків (i та j) називається логічним добутком (кон'юнкція) і позначається $\eta_i(t) \wedge \eta_j(t)$, паралельне з'єднання – логічною сумою (диз'юнкцією) – $\eta_i(t) \vee \eta_j(t)$.

Для наведеної схеми - $v = (\eta_1 \vee \eta_2) \wedge \eta_3 \wedge (\eta_4 \vee \eta_5 \vee \eta_6) \wedge \eta_7 \wedge (\eta_8 \vee \eta_9)$.

При $v = 1$ – система справна, $v = 0$ – система несправна.

7.2. Моделювання продуктивності системи



Заявки 4 та 7 зникають, оскільки в цей час немає вільних пристроїв.

Типи задач при моделюванні структурної схеми:

1. Моделювання точності – за допомогою аналітичних виразів.
2. Моделювання надійності – за допомогою випадкових величин.
3. Моделювання обслуговування – набори часових параметрів.

Моделі сигналів – випадкові впливи, які формуються з допомогою генератора випадкових величин.

Терміни програм структурного моделювання:

- Процес – опис алгоритму роботи деякої частини системи в термінах роботи її блоків.
- Активний блок – на блок був запит і він знаходиться в стані обробки сигналу (запиту).
- Подія – зміна стану будь-якого об'єкта системи або запит ззовні системи.

8. Конструкторське проектування

На етапі конструкторського проектування РЕП функціонально-логічна або принципова електрична схема перетворюється в сукупність конструктивних вузлів, які здійснюють її фізичну реалізацію.

Класи алгоритмів конструкторського проектування:

1. Конструктивні алгоритми формують проектний розв'язок за ряд послідовних кроків (до одного елемента за неявними правилами приєднується другий, до них – третій, і т. д.).

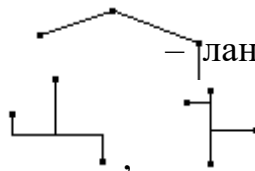
2. Ітераційні алгоритми – задається початкове наближення розв'язку задачі, яке потім поліпшується.

Задачі конструкторського проектування мають за своєю суттю комбінаторний характер (при $N = 10^2 \dots 10^5$ елементів $\in N!$ варіантів).

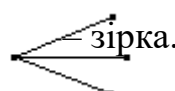
Три стани конструкторського проектування, які спрямовані на зниження розмірності загальної задачі: 1. Компоновка; 2. Розміщення; 3. Трасування.

Розглянемо метрики для відстаней між i -им та j -им компонентами схеми в монтажному просторі:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{ij}^{(1)} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \\ d_{ij}^{(2)} = |x_j - x_i| + |y_j - y_i| \\ d_{ij}^{(3)} = |x_j - x_i|^S + |y_j - y_i|^S \text{ — для задач оптимізації } (S \geq 1.5). \end{array} \right.$$



ланцюг,



зірка.

— ортогональні з'єднання.

Розглянемо математичну модель РЕ схем у конструкторських САПР.

Довільну вихідну схему представляємо як комутаційну, тобто як набір елементів, зв'язаних між собою з'єднаннями, за якими подають сигнали на полюси елементів.

Елементи схеми та зовнішні виводи кожного елемента нумеруються, а виводи схеми з однаковим потенціалом групуються в комплекси з'єднань і також нумеруються (див. рис. 14).

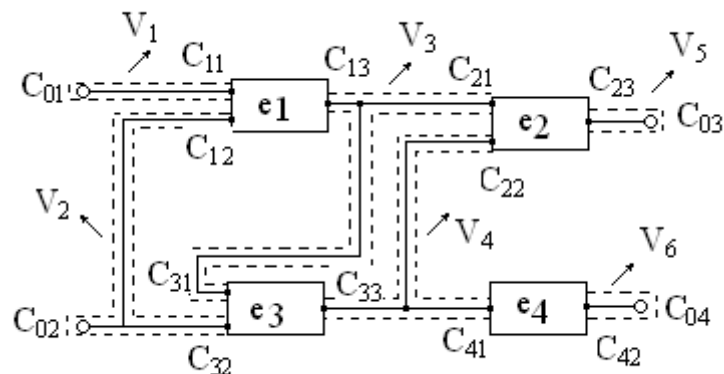


Рис. 14. Комутаційна модель схеми.

Пронумеровані “ n ” елементів схеми складають множину E :

$E = \{e_i, i = 0, 1, \dots, n\}$. Зовнішні виводи елементів утворюють сімейство множин $C_i : \{C_i = \{C_{ij}, j = 1, 2, \dots, K_i\}, i = 0, 1, \dots, n\}$, i – номер елемента, j – номер виводу, K_i – кількість виводів i -го елемента. Елементи множини C_0 (зовнішні виводи схеми) утворюють спеціальну групу. Комплекси з’єднань утворюють сімейство множин $V = \{U_i, i = 1, 2, \dots, M\}$, де U_i – множина еквіпотенціальних виводів, M – кількість комплексів.

Наведене формальне зображення можна відтворити графом, якщо елементи множин E, C, V розглядати як вершини і ввести два види ребер:

- 1) елементні ребра F – визначають належність виводів до елементів;
- 2) сигнальні ребра W – визначають належність виводів до комплексів з’єднань.

Граф із вершинами трьох типів (E, C, V) та ребрами двох типів (F, W) дає найбільш детальне представлення схеми (див. рис. 15).

$$W = \{\omega_1, \dots, \omega_{15}\}$$

$$F = \{f_1, \dots, f_{15}\}$$

Часто використовується граф, в якому вершини C_i втягуються у вершини E і зникають елементні ребра F .

Для відображення комутаційної схеми в ПЕОМ застосовується як матричне, так і списочне зображення графів.

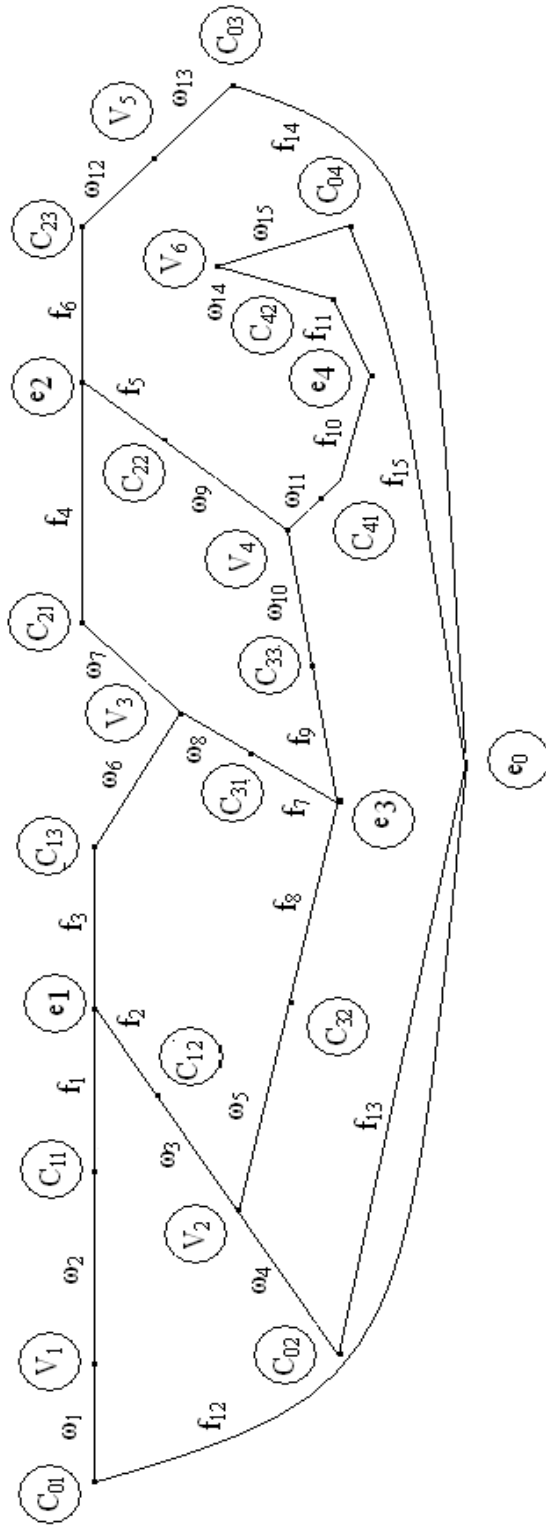


Рис. 15. Граф комутативної схеми (див. рис. 14)

9. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ MICRO CAP

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

СТВОРЕННЯ ТА РЕДАГУВАННЯ ПРИНЦИПОВИХ СХЕМ

СХЕМИ СТВОРЮЮТЬСЯ ТА РЕДАГУЮТЬСЯ З ДОПОМОГОЮ НАБОРУ КОМАНД, ЗГРУПОВАНИХ В СИСТЕМІ СПАДНИХ МЕНЮ. ДОСТУПНІ КОМАНДИ ТА ВІДПОВІДНІ ЇМ ПІКТОГРАМИ ЯСКРАВО ВИСВІЧУЮТЬСЯ, НЕДОСТУПНІ ЗАТЕМНЕНІ.

1.1. МЕНЮ FILE

МЕНЮ **FILE** ВКЛЮЧАЄ КОМАНДИ ДЛЯ РОБОТИ З ФАЙЛАМИ СХЕМ, ТЕКСТОВИМИ ЗАВДАННЯМИ В ФОРМАТІ SPICE, ФАЙЛАМИ БІБЛІОТЕК МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ТЕКСТОВИМИ ДОКУМЕНТАМИ:



New: (*Ctrl + N*) Створення нового файлу.



Open: (*Ctrl + O*) Відкриття існуючих файлів.



Save: (*Ctrl + S*) Збереження схеми з активного вікна.

Save As: Збереження схеми з активного вікна в новому файлі.

Paths: Вказання шляхів для збереження файлів.

Translate: Перетворення файлів:



Binary Library to SPICE Text File: Перетворення бінарного файлу бібліотеки *.LIB в текстовий файл *.LIB в форматі SPICE.



SPICE Text File to Binary Library: Перетворення текстового файлу опису моделей в форматі SPICE в бінарний файл бібліотеки.



Schematic to SPICE Text File: Перетворення файлу схеми в текстовий формат SPICE.

Schematic to Printed Circuit Board: Створення файлу списку з'єднань поточної схеми для переходу до створення друкованої плати в форматах Protel, Accel, OrCad, or PADS.

Bill of Materials: Створення списочної характеристики поточної схеми (кількість елементів, їх назви і т.д. і т.п.)

Load MC File: Встановлення файлів результатів розрахунку по методу Монте-Карло (.tno, .ano, .dno файлів).



Revert: Відновлення змісту файлу поточного вікна до збереженої на диску версії.

Delete: Знищення з диску вибраного файлу схеми без збереження в буфері обміну.

Close: (*Ctrl + F4*) Закриття поточного вікна схеми.



Print Preview: Попередній перегляд зображення схеми.



Print: (*Ctrl + P*) Вивід на друк схеми.



Print Setup: Вибір принтера, розміру та орієнтації паперу.

Recent Files: Список останніх використаних файлів.

Exit: (*Alt + F4*) Завершення роботи з програмою *Micro-Cap 7.0*.

1.2. МЕНЮ EDIT

МЕНЮ **EDIT** ВКЛЮЧАЄ КОМАНДИ РЕДАКТУВАННЯ:



Undo: (*CTRL+Z*) Відміна останніх N команд. Число N обмежене тільки RAM пам'яттю і звичайно більше 20.



Redo: (*CTRL+Y*) Redo оператор обернений до оператора Undo.



Cut: (*Ctrl + X*) Видалення вибраного об'єкту і розміщення його в буфер обміну Windows.



Copy: (*Ctrl + C*) Копіювання вибраного об'єкту в буфер обміну.



Paste: (*Ctrl + V*) Копіювання змісту буферу обміну в поточне вікно, місце прив'язки відмічається курсором.



Clear: (*Delete*) Видалення вибраного об'єкту без копіювання в буфер.

Clear Cut Wire: (*Ctrl+Del*) Видалення вибраних з'єднань обрізанням їх точно в межах вказаного боксу.



Select All: (*Ctrl + A*) Вибір всіх об'єктів поточного вікна.

Copy to Clipboard: Копіювання змісту поточного вікна в буфер обміну:

Copy the Visible Portion of Window in BMP Format: Копіювання видимої частини активного вікна в стандартному графічному форматі *BMP*.

Copy the Select Box Part in BMP Format: Копіювання вибраної частини вікна в *BMP* форматі.

Copy the Entire Window in WMF Format: Копіювання активного вікна в *Windows Metafile* форматі.

Copy the Entire Window in EMF Format: Копіювання активного вікна в *Enhanced Metafile* форматі.

Copy the Entire Window to a Picture File: Копіювання активного вікна в *BMP*, *WMF*, або *EMF* форматі (*PCX* формат).



Add Page: Додавання до схеми нової сторінки.



Delete Page: Видалення сторінки (сторінок) схеми.



Refresh Models: Розміщення у вікні тексту опису моделей компонентів, які ще не були в ньому розташовані. Моделі переглядаються в усіх бібліотеках.

Box: Редагування об'єктів в прямокутній рамці (“боксі”):



Step Box: Копіювання фрагменту схеми вказану кількість раз (по горизонталі, вертикалі або в обох напрямках).



Mirror Box: Створення дзеркального відображення фрагмента схеми (відносно вказаної вісі).



Rotate: (*Ctrl + R*) Обертання фрагмента схеми на кут 90 градусів проти годинникової стрілки.



Flip x: Дзеркальне відображення відносно вісі X, яка розташована посередині вибраної області.



Flip y: Дзеркальне відображення відносно вісі Y, яка розташована посередині вибраної області.

Make Macro: (*CTRL+M*) Запис виділеного фрагменту схеми в макрофайл *.MAC.

Change: Зміна деяких параметрів схеми:



Properties: (F10) Встановлення діалогового вікна Schematic Properties для зміни характеристик кольору та надписів схеми.



Attributes: Зміна видимості одинадцяти основних атрибутів всіх компонентів схеми: PART, VALUE, MODEL, TIMING, I/O MODEL, Pin Numbers, і т.д. і т.п.



Color: Зміна кольору вибраного фрагменту у вікні тексту або у вікні схем.



Font: Зміна назви шрифту вибраного тексту, його розміру, стилю та кольору.

Rename Components: Перейменування всіх компонентів та зміна нумерації вузлів, використовуючи стандартні процедури.

Rename Defines: Зміна символічних імен (типу .define) які конфліктують з іменами вузлів.

Reset Node position: Оновлення по умовчанням позицій вузлів.



Bring to Front: Клацання мишкою на вибраних об'єктах, які перекриваються, переміщує нижній об'єкт наверх.



Send to Back: Клацання мишкою на вибраних об'єктах, які перекриваються, переміщує верхній об'єкт вниз.



Go To Flag: Перемальовування схеми, при якому вибраний прапорець (маркер) буде в центрі екрану дисплея.



Find: (*CTRL+F*) Пошук в поточному вікні різних об'єктів схем, тексту або бібліотек. Для цього існують різні Find бокси.



Repeat Last Find: (*F3*) Пошук наступного об'єкту, який відповідає заданному критерію.

Replace: Заміна фрагменту тексту.

1.3. Меню Component

Ієрархічне меню показує повний зміст бібліотек аналогових та цифрових компонентів. Воно дозволяє легко вибрати для формування схеми один з більш ніж 15000 комерційних типових компонентів. Меню складається з наступних секцій (див. мал.1):

Analog Primitives: Бібліотека включає моделі типових аналогових компонентів без вказання значень їх параметрів, згрупованих в підменю типу Passive, Active, Waveform Sources.

Analog Library: Бібліотека включає моделі всіх комерційних аналогових компонентів в підменю типу *BJT, Diode, Vendor*. Останнє підменю складається з промислових підсхем.

Digital Primitives: Бібліотека включає моделі типових цифрових компонентів без вказання значень їх параметрів в підменю типу Standard Gates або Tri-State Gates.

Digital Library: Бібліотека включає моделі всіх комерційних цифрових компонентів в підменю типу 74xx42 або 74xx1000.

Параметри моделей компонентів знаходяться в текстових файлах *.LIB.

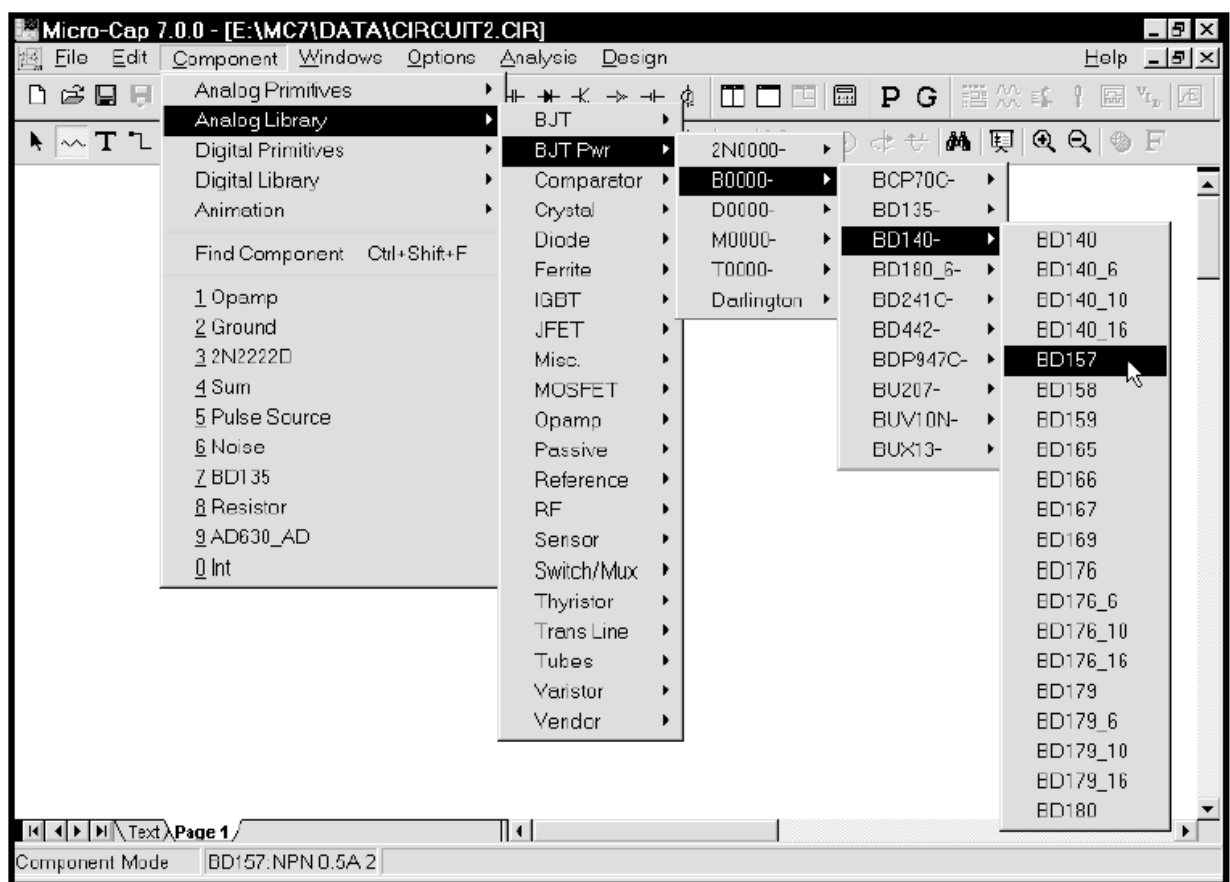
Animation: Цифрові анімаційні пристрої.

Filters: Ця секція присутня, якщо створені фільтри з допомогою меню *Design*.

Macros: Ця секція присутня, якщо створені макроси з допомогою меню *Edit / Box / Make Macros*.

Find Component: (CTRL+SHIFT+F) Пошук в бібліотеці компонента за різними параметрами: *Name, Shape, Definition, Memo, All fields* (див. мал.3).

Last Used: Список 10 останніх встановлених компонент.



Мал.1 Структура меню Component

Після вибору компонента програма *MC7* переходить в режим **Component**. Після розташування відкривається вікно для задання всіх атрибутів вибраного компонента (див. мал.2):

MODEL: Атрибут імені моделі (операційний підсилювач UD 1407, транзистор 2N5304).

PART: Позиційне позначення (R1, C3, RC).

VALUE: Номінальне значення параметру (2.2K, 100pF, 15u).

PACKAGE: Назва корпусу компонентів для програми створення друкованої плати.

COST: Вартість.

POWER: Розсіювана потужність.

Display: Задається видимість характеристик компонента на схемі (точок виводів, їх імен, номерів і т.д.).

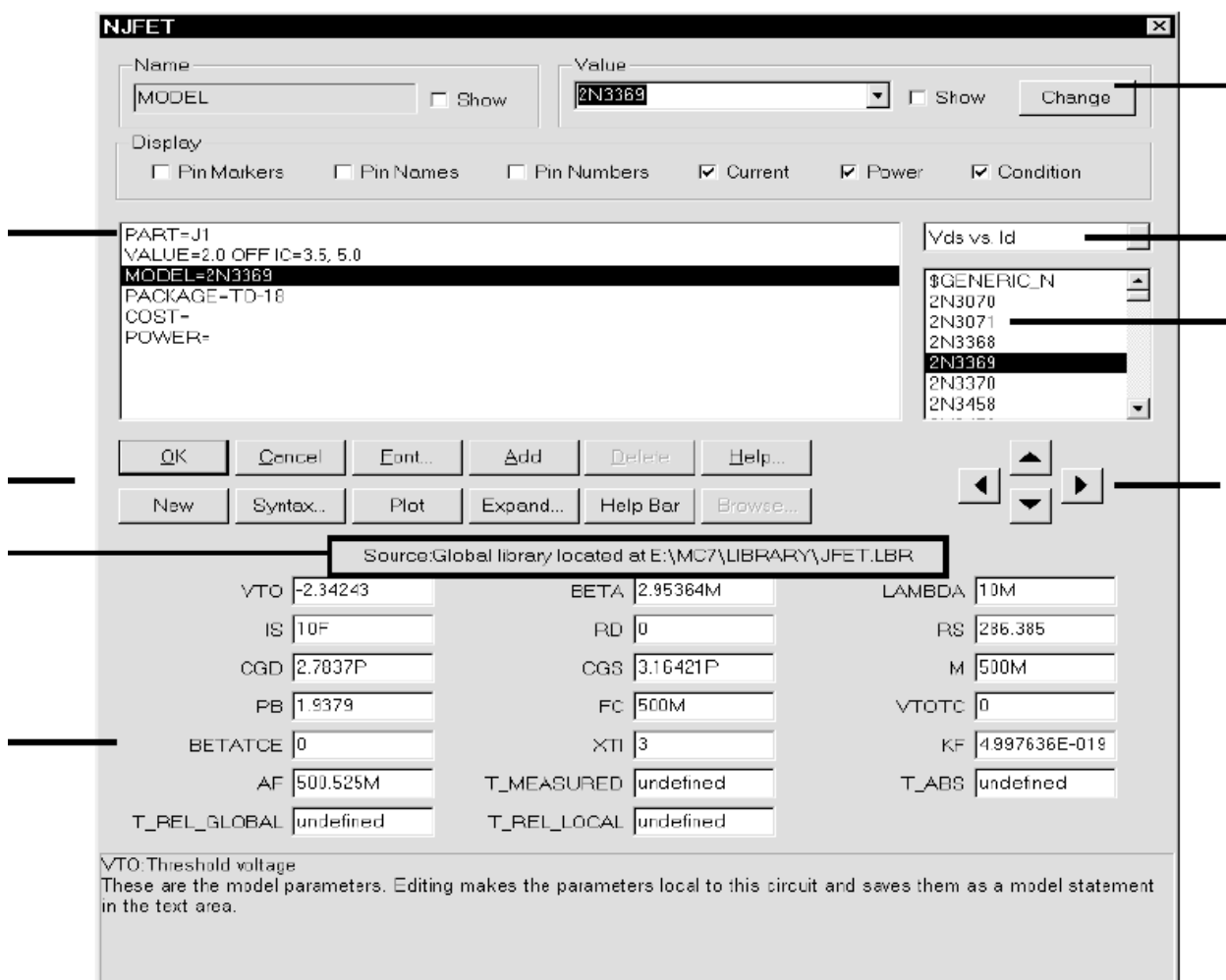
Font: Вибір шрифтів та кольорів.

Add: Додавання рядка для нового атрибуту компонента.

New: Вибір нового атрибуту *MODEL*.

Syntax: Опис синтаксису вибраного компонента.

Plot: Графіки характеристик компонента (ВАХ, перехідні і т.д.)



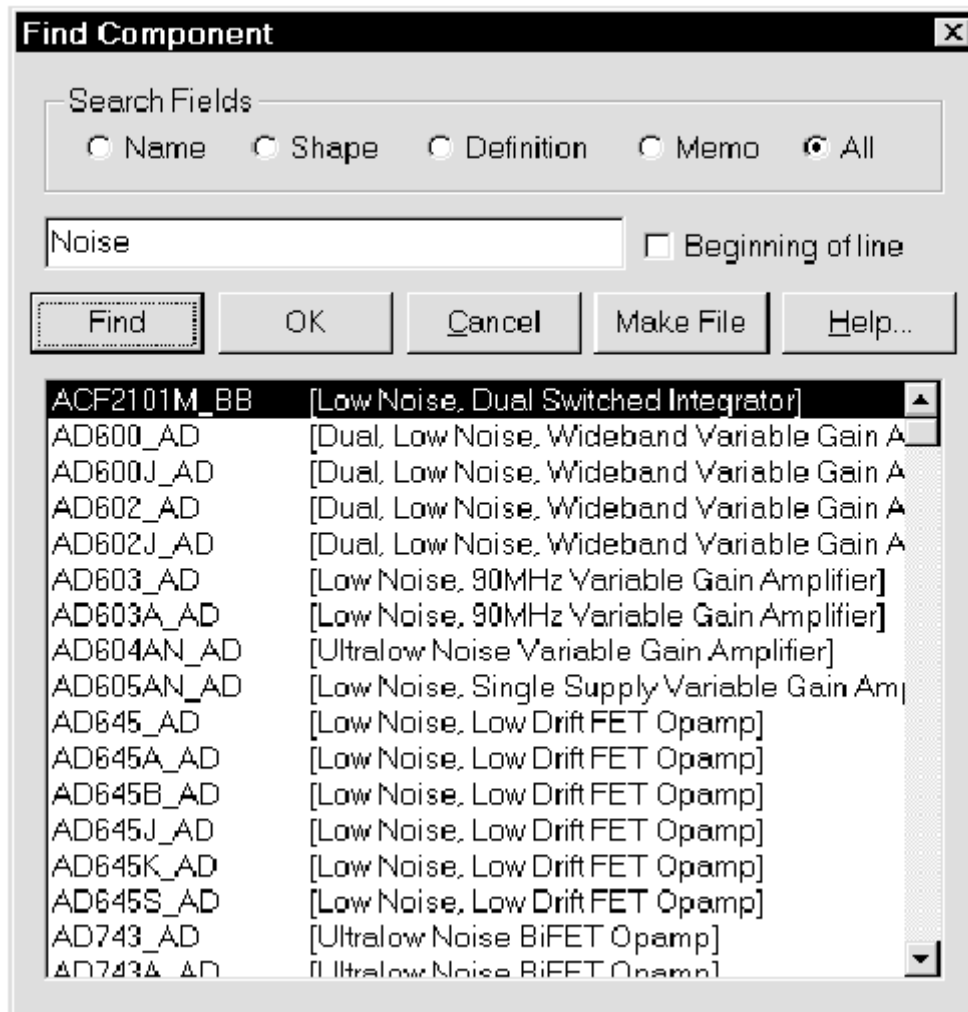
Мал.2 Структура вікна для задання атрибутів компонента

Browse: Перегляд файлів.

Change: Зміна параметрів компоненти.



: Клавiші керування вибором компонентів схеми. Пересування вліво або вправо вибирає компоненти одного типу. Пересування вгору або вниз вибирає нові типи компонентів.



Мал.3 Структура боксу Find Component

1.4. МЕНЮ WINDOWS

МЕНЮ **WINDOWS** ВКЛЮЧАЄ КОМАНДИ РОБОТИ З ВІКНАМИ:



Cascade: (*Shift + F5*) Каскадне розташування відкритих вікон.



Tile Vertical: (*Shift + F4*) Послідовне розташування відкритих вікон по вертикалі.



Tile Horizontal: Послідовне розташування відкритих вікон по горизонталі.



Overlap: Дозвіл накладати вікно результатів аналізу поверх вікна схем або навпаки.



Maximize: Максимізація активного вікна схем.

Arrange Icons: Впорядкування розміщення іконок згорнутих вікон в нижній частині екрану.



Zoom-In: (*Ctrl + Numeric pad +*) Збільшення масштабу зображення (але не масштабу друку).



Zoom-Out: (*Ctrl + Numeric pad -*) Зменшення масштабу зображення.

Toggle Drawing/Text: (*Ctrl + G*) Переключення між вікном схем і відповідним йому вікном тексту.

Split Horizontal: Розділення горизонтально робочого вікна на вікно схем та вікно тексту.

Split Vertical: Розділення вертикально робочого вікна на вікно схем та вікно тексту.

Remove Splits: Розгортання вікна схем на весь екран з закриттям вікна тексту.

Component Editor: Перехід в режим редагування бібліотеки компонентів.

Shape Editor: Перехід в режим редагування графіки символів компонентів.

Package Editor: Виклик редактора упаковки компонентів (інформація про тип корпусу необхідна для складання списку з'єднань, які передаються в редактори друкованих плат).

Model Program: Виклик програми аналізу моделей аналогових компонентів (типу *BJT's, Diodes, Mosfets, Jfets, Opamps, Cores*).



Calculator: Виклик вбудованого калькулятора.

Check Model Library Parameters: Перевірка параметрів моделей в бібліотеці Model library.

Files in Memory: Список відкритих файлів схем або текстів.

1.5. МЕНЮ OPTIONS

Меню **Options** складається з команд вибору режиму редагування та задання різноманітних опцій програми MC7:

Main Tool Bar: (*Ctrl + O*) Включення / виключення рядка інструментів.

Default Main Tool Bar: Відновлення рядка інструментів з опціями по умовчанню.

Status Bar: Включення / виключення рядка опису поточної команди.

Mode: Підменю **Mode** включає ряд мод операцій для схем та аналізу (див. розділ 1.6).

View: Підменю **View** включає вибір інформації, видимій на схемі (див. розділ 1.7).



Show All Paths: Складання списку всіх можливих шляхів розповсюдження цифрових сигналів з вказанням затримок. Вибраний з списку шлях висвічується на схемі.



Preferences: (*CTRL+Shift+P*) Відкриття діалогового вікна для зміни кольору, шрифтів, вигляду рядка інструментів і т.д. і т.п., значення яких зберігаються в файлі поточної схеми.



Rubberbanding: (*CTRL+Shift + R*) Зміна форми з'єднувальних провідників без утворення обривів на їх кінцях.

Default Properties For New Circuits: Задання по умовчанню переліку параметрів нової схеми.



Global Settings: (*CTRL+Shift+G*) Задання глобальних параметрів, які визначають режим моделювання.

User Definitions: Запис в файл MСАР.ІNC. глобальних визначень (моделей, констант, функцій), які автоматично включаються у файли описів всіх схем.

Model Parameter Limits Editor: Включення редактора границь модельних параметрів. Значення, встановлені по умовчання, редагувати заборонено.

Component Palettes 1-9: (*Ctrl + 1, ..., Ctrl + 9*) Вивід на вікно схем від 1 до 9 панелей з списком компонентів для їх швидкого вибору при складанні схеми. Склад компонентів в панелях визначається в режимі **Component Editor**.

1.6. МЕНЮ MODE



Select: (*Ctrl + E*) Вибір об'єктів для наступного редагування.



Component: (*Ctrl + D*) Додавання компонента в схему.



Text: (*Ctrl + T*) Нанесення на схему довільних текстових коментарів.



Wire: (*Ctrl + W*) Ввід ортогональних з'єднань.



WireD: Ввід з'єднань довільної орієнтації.



Малювання графічних об'єктів:

Line: Лінія.

Rectangle: Прямокутник.

Diamond: Ромб.

Ellipse: Еліпс та коло.

Arc: Дуга.

Pie: Сектор.



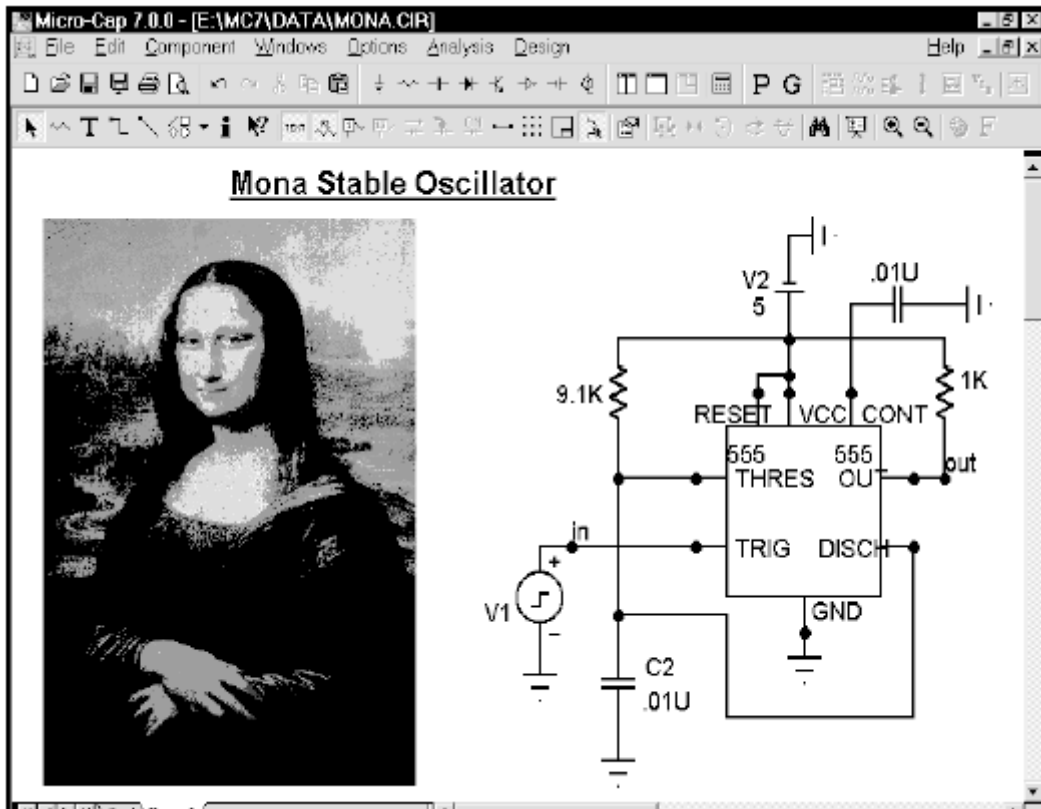
Polygon: Малювання полігону.



Flag: Ввід маркерів для швидкої навігації по схемі.



Picture: Встановлення у вікно схем малюнків (див. мал.4):



МАЛ.4 СХЕМА З JPG ФАЙЛОМ



Scale: (F7) Вивід на весь екран частини графіку в рамці.



Cursor: (F8) Режим електронного курсора.



Point Tag: Нанесення на графік значень координат (X,Y) вибраної точки.



Horizontal Tag: Нанесення відстані по горизонталі між двома вибраними точками графіка.



Vertical Tag: Нанесення відстані по вертикалі між двома вибраними точками графіка.



Help: (Ctrl + H) Виклик текстової інформації про модель компонента, який вибраний курсором.



Info: (Ctrl + I) Вивід інформації про параметри вибраного компонента.



Point to End Paths: Розрахунок затримок сигналів на всіх шляхах до вибраного цифрового компонента. This option enables the digital point to end paths mode. Clicking the left mouse button on a digital component invokes the Path dialog box which displays all the possible digital paths originating from the component along with the time delay through the paths. The highlighted path will be traced in the schematic.



Point to Point Paths: Розрахунок затримок сигналів шляхів, які з'єднують два вибраних цифрових компоненти.

1.7. МЕНЮ VIEW



Attribute Text: Позиційні позначення компонентів.



Grid text: Текстові надписи.



Node Numbers: Номера вузлів схеми.



Node Voltages / States: Вузлові потенціали аналогових вузлів та логічні стани цифрових вузлів в режимі постійного струму.



Current: Струми віток.



Power: Розсіювана потужність.



Condition: Стани *p-n* переходів (*LIN* – лінійний режим, *ON* – відкритий, *OFF* – закритий, *SAT* – знаходиться в режимі насичення, *HOT*).



Pin Connections: Виводи компонентів.



Grid: Вузли сітки.



Cross-hair Cursor: Курсор у вигляді перехрестя на весь екран.



Border: Нанесення рамки на креслення схеми.



Title: Зображення кутового штампу (основного надпису).

1.8. Меню Analysis

Меню **Analysis** включає перелік режимів моделювання:

Transient Analysis: (*Alt+1*) Аналіз перехідних процесів.

AC Analysis: (*Alt+2*) Аналіз частотних характеристик.

DC Analysis: (*Alt+3*) Аналіз передаточних характеристик по постійному струму.

Dynamic DC: (*Alt+4*) Розрахунок режиму по постійному струму і його динамічне відображення на схемі.

Transfer Function: (*Alt+5*) Розрахунок передаточних функцій по постійному струму, а також вхідного та вихідного опору.

Sensitivity: (*Alt+6*) Розрахунок чутливості по постійному струму одного або декількох вихідних виразів по відношенню до одного або декількох вхідних параметрів.

Probe Transient Analysis: (*CTRL+ALT+1*) Аналіз перехідних процесів і відображення їх результатів в режимі **Probe**.

Probe AC Analysis: (*CTRL+ALT+2*) Аналіз частотних характеристик і відображення їх результатів в режимі **Probe**.

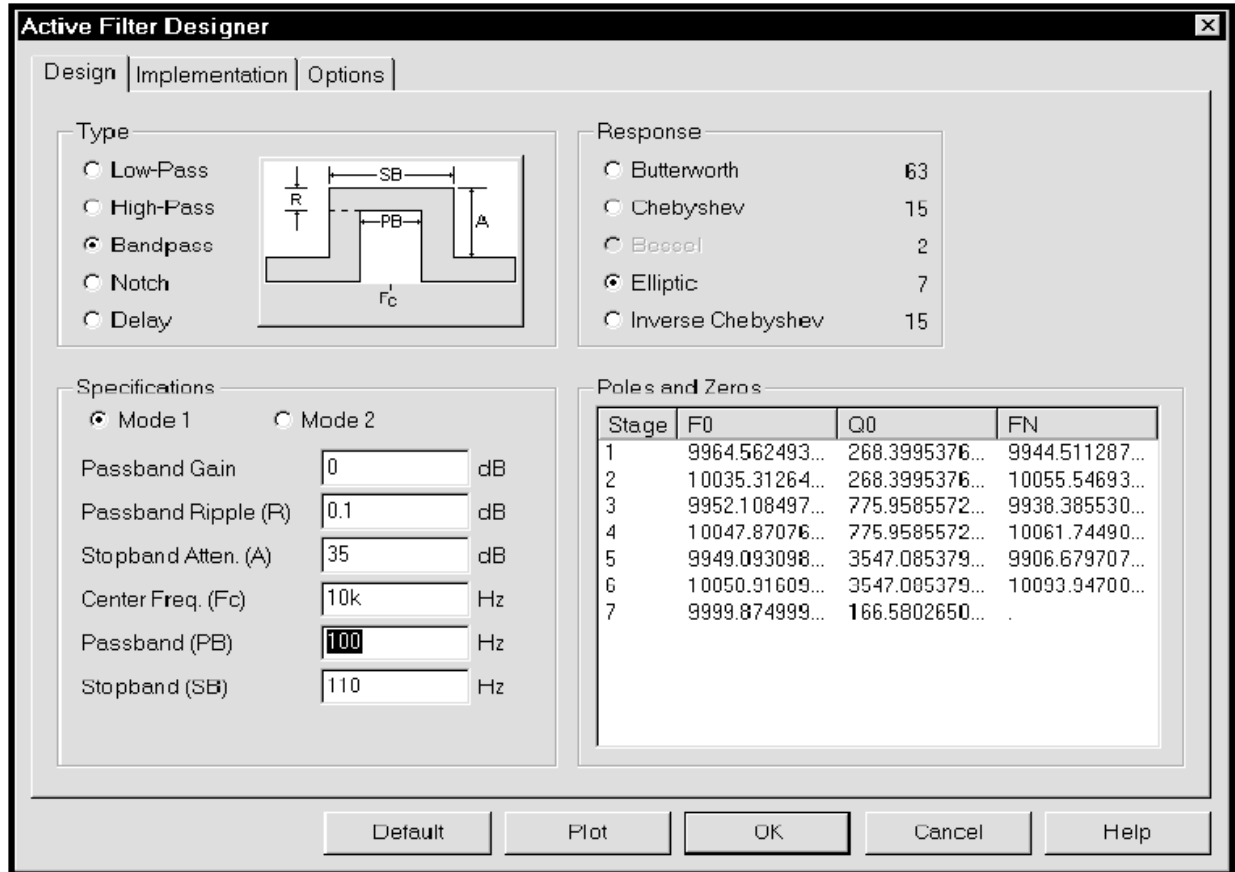
Probe DC Analysis: (*CTRL+ALT+3*) Аналіз передаточних функцій по постійному струму і відображення їх результатів в режимі **Probe**.

1.9. Меню Design

Меню **Design** включає команди синтезу активних та пасивних аналогових фільтрів:

Active Filters: Частина програми синтезу активних фільтрів після задання специфікацій. Фільтри можуть бути створені як схема або як макрокомпонента.

Passive Filters: Частина програми синтезу пасивних фільтрів з заданими специфікаціями, використовуючи ємності та індуктивності. Отримуються ідеальні передаточні криві. Фільтри можуть бути створені як схема або як макрокомпонента.



МАЛ.5 СИНТЕЗАТОР АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

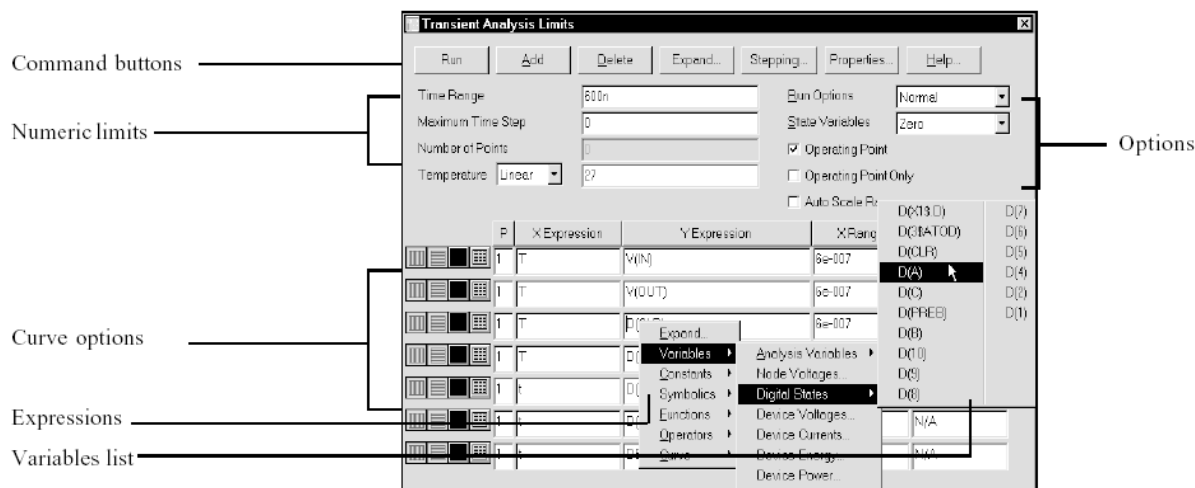
ВИКОНАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ (TRANSIENT ANALYSIS)

Після переходу в режим аналізу перехідних процесів **Transient** програма MS7 перевіряє правильність складання схеми. При наявності помилок виводиться інформаційне повідомлення. При відсутності помилок в схемі програма складає її топологічний опис, виконує підготовку до чисельного розрахунку перехідних процесів та відкриває вікно задання параметрів моделювання (Transient Analysis Limits).

ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ (TRANSIENT ANALYSIS LIMITS DIALOG BOX)

Вікно задання параметрів моделювання перехідних процесів має наступних п'ять розділів:



МАЛ.6 ВІКНО ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ (TRANSIENT ANALYSIS LIMITS DIALOG BOX)

Команди (Command Buttons)

 **Run:** (F2) Початок моделювання.

Add: Додавання ще одного рядка специфікації виводу результатів після рядка, відміченого курсором.

Delete: Знищення рядка специфікації виводу результату, відміченого курсором.

Expand: Відкриття додаткового вікна для занесення тексту більшого розміру.

Stepping: Відкриття діалогового вікна задання варіації параметрів.

Properties: Відкриття діалогового вікна з закладками для зміни різних властивостей.

Help: Виклик розділу Transient Analysis системи допомоги.

Numeric Limits (Чисельні параметри)

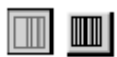
Time Range: Визначення початкового та кінцевого часу розрахунку по формату T_{max} [T_{min}]. Від'ємні значення заборонені. Для цифрових компонентів $T_{min}=0$.

Maximum Time Step: Максимальний крок інтегрування. По умовчанням він рівний $(T_{max}-T_{min})/50$.

Number of points: Кількість точок, які виводяться в таблиці, тобто кількість рядків в таблиці виводу результатів. По умовчанням приймається 51. Інтервал виводу даних рівний $(T_{max}-T_{min}) / (<Number of points> - 1)$.

Temperature: Діапазон зміни температури в градусах Цельсія. При виборі параметру Linear формат: $<high>[,<low>[,<step>]]$. При виборі параметру List формат наступний: $<t1>[,<t2>[,<t3>[,...]]]$.

Curve Options (Вивід результатів моделювання)



X Log/Linear Scale: Переключення між логарифмічною та лінійною шкалою по вісі X.



Y Log/Linear Scale: Переключення між логарифмічною та лінійною шкалою по вісі Y.



Color: Виклик меню для вибору одного з 64 кольорів для фарбування графіків.



Numeric Output: В текстовий вихідний заноситься таблиця значень функції, заданої в графі *Y expression*. Запис іде в файл “<ім’я схеми>.TNO”.

Plot Group: В графі **P** числом від 1 до 9 вказується номер графічного вікна, в якому буде побудована дана функція. Всі функції, відмічені одним і тим же номером, виводяться в одному вікні. Якщо це поле пусте, графік функції не будується.

Expressions (Вирази)

X expression: Ім’я змінної величини, яка відкладається по вісі *X*. Звичайно це час *T* (Time), але не завжди.

Y expression: математичний вираз для змінної, яка відкладається по вісі *Y*. Це може бути як проста змінна типу $V(6)$ – напруга у вузлі, $I(2,3)$ – струм вітки, так і довільний математичний вираз типу $V(VCC)*I(VCC)$, $V(2)*I(V1)*\sin(2*PI*1E6*T)$. Права кнопка мишки в графі *Y expression* викликає контекстне меню вибору довільних змінних, констант, операторів, функцій.

X range: Максимальне та мінімальне значення змінної *X* на графіку по формату

<high> [,<low>] [,<grid spacing>] [,<bold grid spacing>]

<grid spacing> - масштаб тонкої сітки, <bold grid spacing> - масштаб товстої сітки. Режим AUTO – автоматичний вибір діапазону зміни.

Y range: Максимальне та мінімальне значення змінної *Y* на графіку згідно того ж формату.

Options (Опції)

Run Options (Керування видачею результатів розрахунку)

Normal: Результати розрахунку не зберігаються.

Save: Збереження результатів розрахунків в бінарному дисковому файлі ”<Ім’я схеми>.TSA”.

Retrieve: Зчитування останніх результатів розрахунку з дискового файлу.

State Variables (встановлення початкових умов)

Zero: Встановлення нульових початкових умов для потенціалів всіх аналогових вузлів та струмів через індуктивності і невизначених логічних станів “X” для цифрових вузлів.

Read: Зчитування початкових умов з дискового файлу “<Ім’я схеми>.TOP” перед кожним новим розрахунком.

Leave: Встановлення в якості початкових умов значень, отриманих при закінченні розрахунку попереднього варіанту.

Operating Point: Включення режиму розрахунку по постійному струму перед кожним розрахунком перехідних процесів.

Operating Point Only: Розрахунок тільки режиму по постійному струму (без перехідних процесів).

Auto Scale Ranges: Присвоєння ознаки автоматичного масштабування “Auto” по осям X, Y для кожного нового варіанта розрахунку.

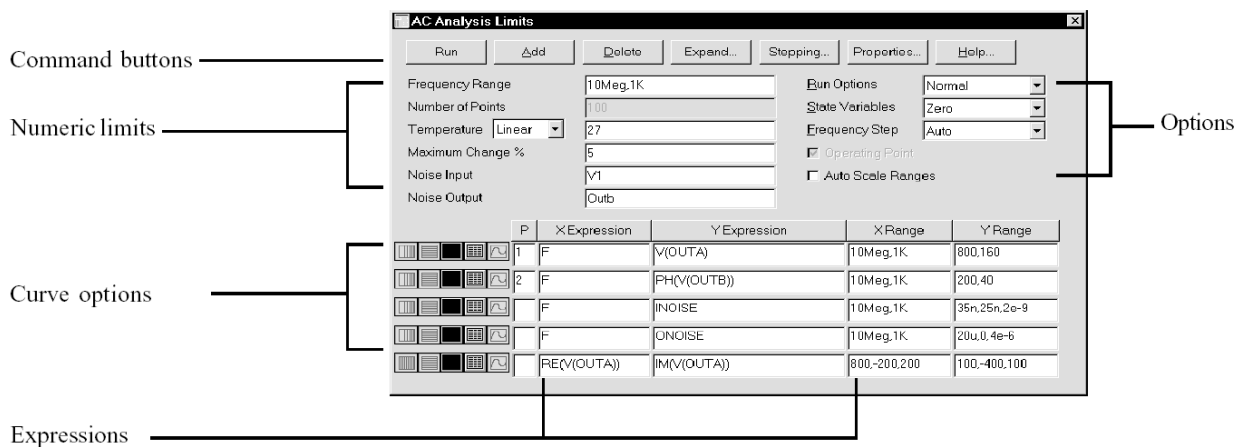
2.2. РОЗРАХУНОК ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК (AC ANALYSIS)

В режимі AC спочатку розраховується режим по постійному струму, потім лінеарізуються всі нелінійні компоненти (пасивні компоненти з нелінійними параметрами, діоди, транзистори, нелінійні керовані джерела) і виконується розрахунок комплексних амплітуд вузлових потенціалів та струмів віток. При лінеаризації цифрові компоненти замінюються їх вхідними та вихідними комплексними опорами, передача сигналів через них не розглядається.

До входу схеми необхідно підключити джерело синусоїдального SIN або імпульсного сигналу PULSE або сигналу USER, форма якого задається користувачем. При розрахунку частотних характеристик комплексна амплітуда цього сигналу приймається за 1 В, початкова фаза нульова, а частота змінюється у вказаних межах. Можливе також підключення незалежних джерел напруги V або струму I в форматі SPICE, для яких значення амплітуди та фази задаються.

При відсутності помилок в схемі програма складає її топологічний опис, виконує підготовку до чисельного розв’язку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь і відкриває вікно задання параметрів моделювання AC Analysis Limits (див. мал.7).

ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ (AC ANALYSIS LIMITS DIALOG BOX)



Мал.7 Вікно задання параметрів розрахунку частотних характеристик (AC Analysis Limits dialog box)

ПРИВЕДЕМО ОПИС НОВИХ ПАРАМЕТРІВ, ЯКІ ВІДСУТНІ У ПОПЕРЕДНЬОМУ АНАЛІЗНОМУ ВІКНІ (ДИВ. МАЛ.6):

Numeric Limits (Чисельні параметри)

Frequency range: Специфікація кінцевої та початкової частоти по формату F_{max} , F_{min} .

Maximum Change %: Максимально допустимий приріст графіка першої функції на інтервалі кроку по частоті (в % від повної шкали).

Noise Input: Ім'я джерела сигналу, підключеного на вхід кола. В графі *Y expression* виводиться графік квадратного кореня спектральної густини напруги або струму внутрішніх шумів кола, перерахованих до входу.

Noise Output: Номера вихідних вузлів кола, в яких розраховується відповідна спектральна густина. Формат Вузол1[,Вузол2].



Plot Type: Вибір системи координат для побудови графіків. Є три види:



Rectangular – прямокутна,



Polar – полярна,



Smith Chart – діаграмна.

Options (Опції)

Frequency Step (Крок зміни частоти)

Auto: Автоматичний вибір кроку по частоті.

Linear: Лінійний крок по частоті.

Log: Логарифмічна шкала частоти.

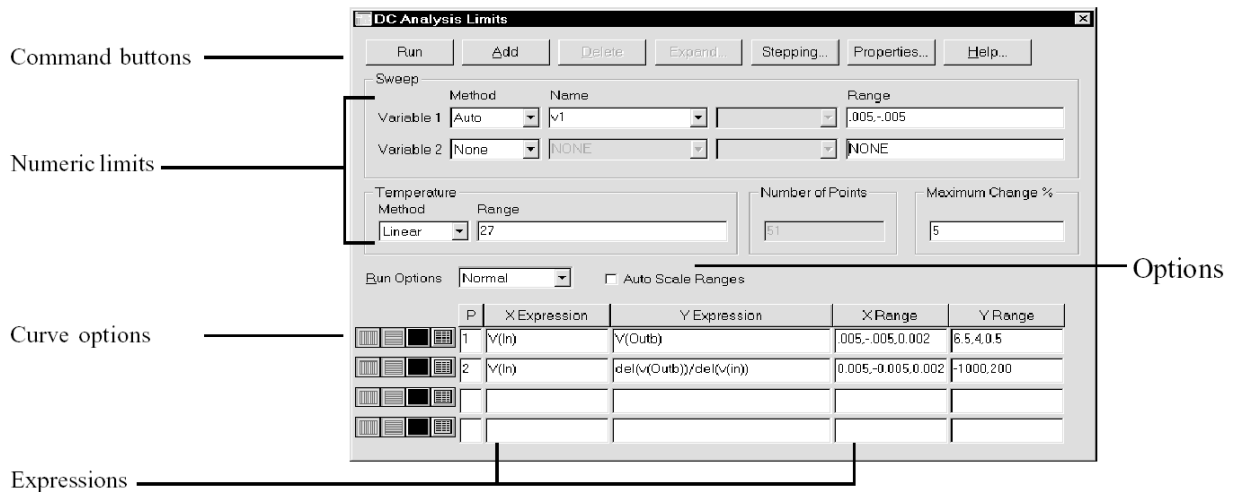
List: Список частот з діапазону Frequency Range, наприклад, 1E8, 1E7, 5E6.

2.3. Розрахунок передаточних функцій по постійному струму (DC Analysis)

В режимі **DC** розраховуються передаточні характеристики по постійному струму. До входу кола підключається один або два незалежних джерела напруги або струму. В якості вихідного сигналу може розглядатися різниця вузлових потенціалів або струм через вітку, в яку включений резистор. Програма закорочує індуктивності, розмикає конденсатори і потім проводить розрахунки.

Після виконання підготовки до чисельного розрахунку нелінійних рівнянь ітераційним методом Ньютона-Рафсона відкривається вікно задання параметрів моделювання DC Analysis Limits.

ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ (DC ANALYSIS LIMITS DIALOG BOX)



МАЛ.8 ВІКНО ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗРАХУНКУ В РЕЖИМІ DC (DC ANALYSIS LIMITS DIALOG BOX)

ПРИВЕДЕМО ОПИС НОВИХ ПАРАМЕТРІВ, ЯКІ ВІДСУТНІ У ПОПЕРЕДНІХ ВІКНАХ АНАЛІЗУ (ДИВ. МАЛ.6,7):

Numeric Limits (Чисельні параметри)

Variable1: Задання параметрів першої змінної, яка буде варіюватись. Значення її, як правило, змінюються по вісі X.

Method: Вибір методу варіювання змінної:

Auto: Автовибір.

Linear: Лінійний по формату <final>[,<initial>[,<step>]]

Log: Логарифмічний з форматом <final>[,<initial>[,<multiplier>]]

List: У вигляді списку значень <v1>[, <v2>[, <v3>[, ...[,<vn>]]]]

Name: З списку вибирається ім'я змінної; в правому вікні після цього необхідно вибрати параметр його математичної моделі, який буде змінюватись.

Range: Діапазон зміни досліджуваної величини, який залежить від методу.

Variable 2: Задання параметрів другої змінної, яка буде варіюватись (Method, Name, and Range).

2.4. Розрахунок режиму по постійному струму (Dynamic DC analysis)

По команді **Analysis>Dynamic DC** проводиться розрахунок режиму по постійному струму та його відображення на малюнку схеми. Параметр **Show Slider** (в **Options>Preferences**) розміщує на схемі біля джерел та резисторів повзункові регулятори для зміни номіналів цих компонентів та отримання нових значень розрахунку по постійному струму. Об'єм інформації, яка виводиться на схему визначається наступними піктограмами (**Dynamic DC Display Options**):



Node voltages / digital states: Напруги аналогових вузлів або логічні стани цифрових вузлів.



Device pin currents: Струми віток.



Device power: Потужності, які розсіюються у вітках.

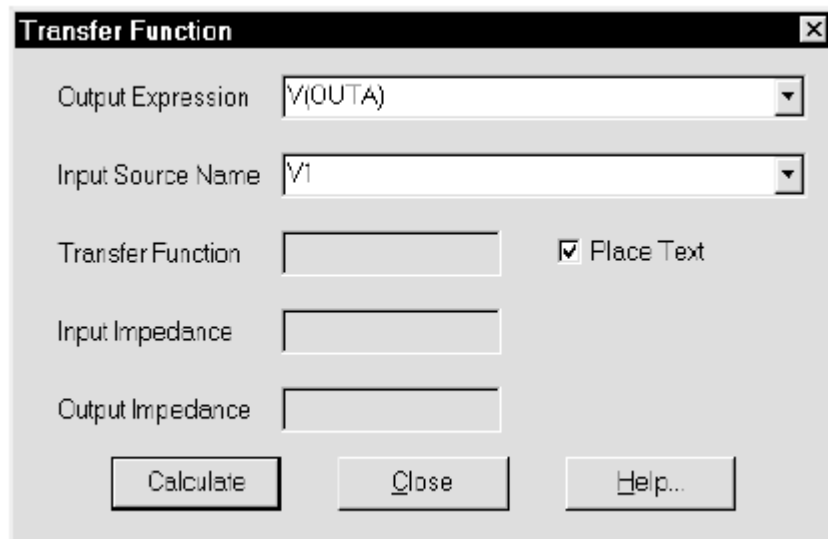


Device condition (ON, OFF, SAT, LIN, etc.): Стани р-п переходів: **ON** – перехід відкритий; **OFF** – перехід закритий; **SAT** – знаходиться в режимі насичення; **LIN** – лінійний режим.

Після закінчення розрахунків по командам **Analysis>Transient, AC, DC** на схемі зображаються останні значення режиму по постійному струму.

2.5. РОЗРАХУНОК МАЛОСИГНАЛЬНИХ ПЕРЕДАТОЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК (TRANSFER FUNCTION ANALYSIS)

По команді **Analysis>Transfer Function** виконується розрахунок малосигнальних передаточних функцій в режимі по постійному струму, які розраховуються після лінеаризації схеми в околі робочої точки. Завдання на розрахунок складається в діалоговому вікні (див. мал..9):



Мал.9 Діалогове вікно **Transfer Function**

Voltage gain: Input voltage source and output expression = $V(\text{OUT})$

Current gain: Input current source and output expression = $I(\text{RL})$

Transconductance: Input voltage source and output expression = $I(\text{RL})$

Transadmittance: Input current source and output expression = $V(\text{OUT})$

Output Expression: Вираз для вихідної змінної (наприклад $V(\text{A},\text{B})$ або $I(\text{R1})$).

Input Source Name: Ім'я вхідного джерела (напруги або струму, типу V_{IN}).

Transfer Function: Результат розрахунку передаточної функції (наприклад $dV(\text{A},\text{B})/dV_{\text{IN}}$).

Input Impedance: Значення вхідного опору.

Output Impedance: Значення вихідного опору.

Place Text: При виборі цієї опції результати розрахунку розміщуються безпосередньо на схему.

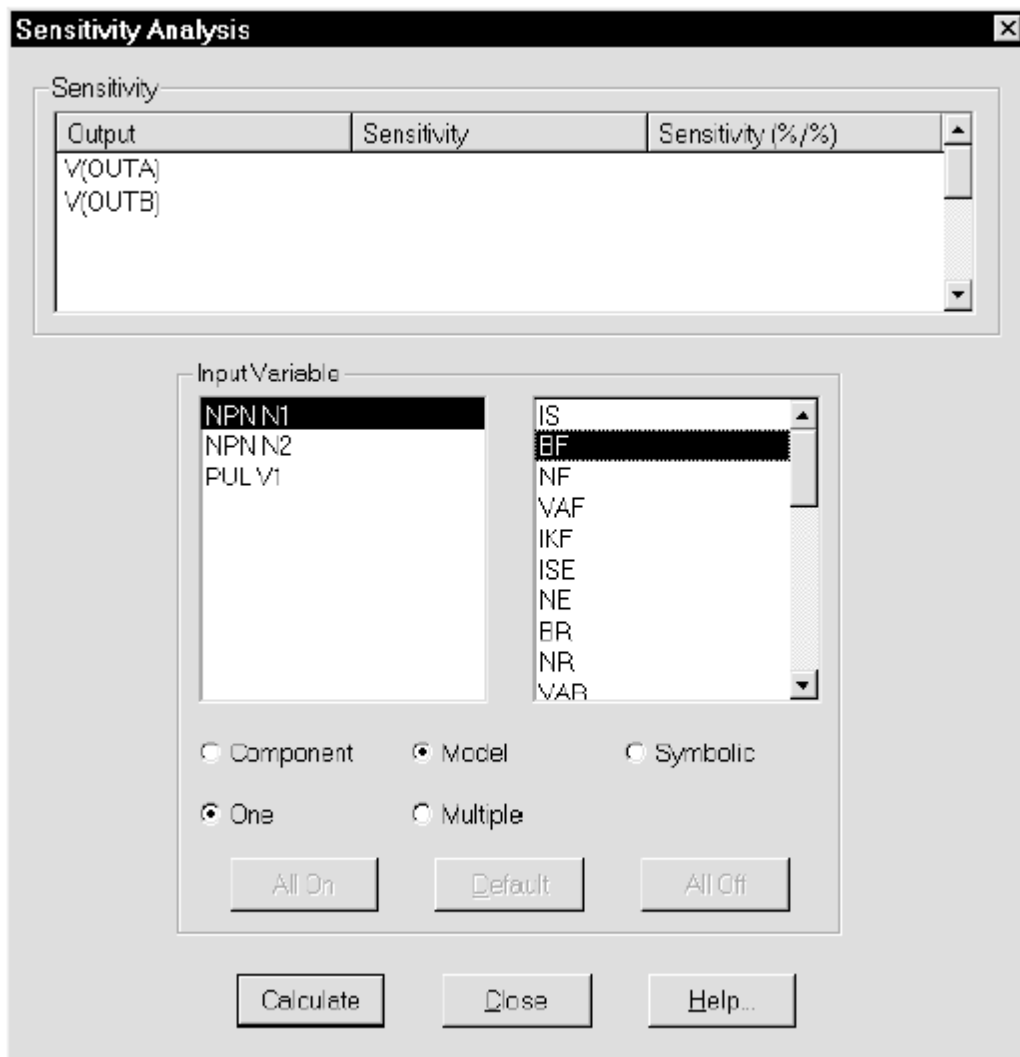
Calculate: Проводиться розрахунок передаточної функції.

2.6. Розрахунок чутливості по постійному струму (Sensitivity analysis)

Чутливість режиму по постійному струму розраховується по команді **Analysis> Sensitivity**. Чутливість розраховується після лінеаризації схеми в околі робочої точки. При цьому розраховується чутливість однієї або декількох вихідних змінних до зміни вибраних параметрів схеми. Чутливість визначається як:

Зміна вихідної величини / Мала зміна вхідної величини.

Діалогове вікно команди показано на мал.10.



Мал.10 Діалогове вікно **Sensitivity Analysis Limits dialog box**

Sensitivity group: Поле для розміщення вихідних виразів та результатів розрахунку. Є три наступні розділи:

Output: Місце для запису та редагування вихідних змінних (напр. I(R1)).

Sensitivity: Результати розрахунку чутливості. Якщо вибрані декілька вхідних змінних, то результати розміщуються в окремий файл CIRCUITNAME.SEN.

Sensitivity %/%%: Результати чутливості в процентах.

Input Variable: Вибирається вхідний параметр. Є декілька клавіш для уточнення типу вхідних змінних:

Component: Компонент схеми.

Model: Математична модель з своїми параметрами.

Symbolic: Символічний параметр (утворюється з розширеннями .define або .param).

Input Variable: Вибирається вхідний параметр. Є декілька клавіш для уточнення типу вхідних змінних:

Component: Компонент схеми.

Model: Математична модель з своїми параметрами.

Symbolic: Символічний параметр (утворюється з розширеннями .define або .param).

One: Вибір одного параметру для тестування.

Multiple: Вибір багатьох параметрів. Уточнення дають наступні клавіші:

All On: Вибрати всі параметри для всіх пристроїв.

Default: По умовчанняю вибирається спеціальний список параметрів для всіх пристроїв.

All Off: Відміна вибору всіх параметрів для всіх пристроїв. Вручну можна вибрати окремі параметри (CTRL+ім'я параметру).

Calculate: Початок розрахунку чутливості.

2.7. Фур'є аналіз (Fourier Analysis) та цифрова обробка сигналів (Digital Signal Processing)

Функції цифрової обробки сигналів (DSP functions) є групою математичних функцій для отримання частотної та часової інформації з результатів розрахунку перехідних процесів та частотних характеристик. Всі функції використовують стандартне внутрішнє пряме перетворення Фур'є (Forward Fourier Transform – FFT). Ця процедура вимагає задання двох базових параметрів: N – кількість відліків (Number of data points), DF – зразкова частота.

N : • *Minimum* = 64 або 2^6 • *Maximum* = 262144 або 2^{18} .

DF розраховується наступним чином:

При *Transient analysis*: 1) якщо в *DSP dialog box* режим Off то $DF = \text{sampling frequency} = 1/\text{1st harmonic} = 1 / \langle tmax \rangle$; 2) якщо в *DSP dialog box* режим On то $DF = 1/\text{1st harmonic} = 1 / (\langle Upper Time Limit \rangle - \langle Lower Time Limit \rangle)$

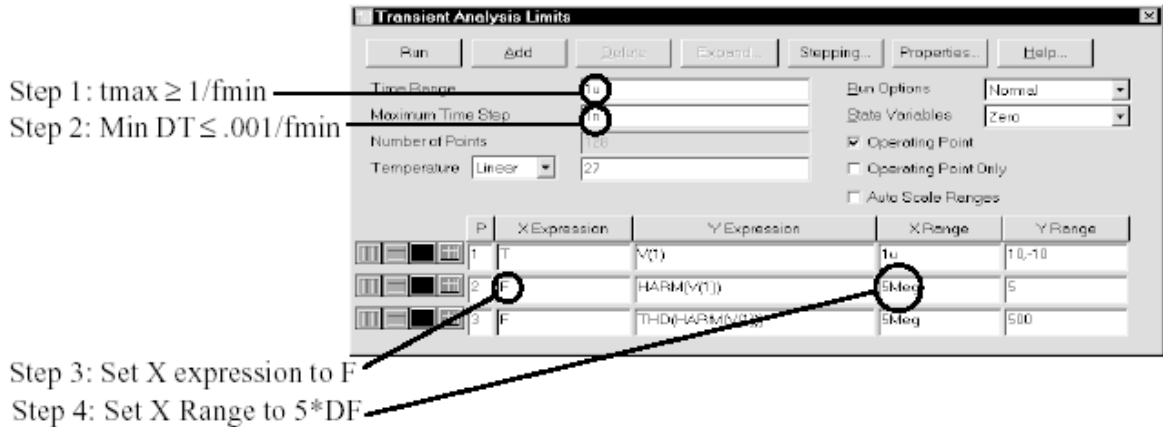
При *AC analysis*: 1) якщо в *DSP dialog box* режим Off то $DF = 1/\text{1st harmonic} = \text{sampling frequency} = \langle fmax \rangle / N$; 2) якщо в *DSP dialog box* режим On то $DT = \text{Time Step} = 1 / DF = N / \langle Upper Freq Limit \rangle$.

Приклад:

	Data Point	Contents
1		0 Hz або DC value
2		H1 = 1'st harmonic при $F = DF$
3		H2 = 2'nd harmonic при $F = 2*DF$
....		
N		HN = N-1'th harmonic при $F = (N-1)*DF$

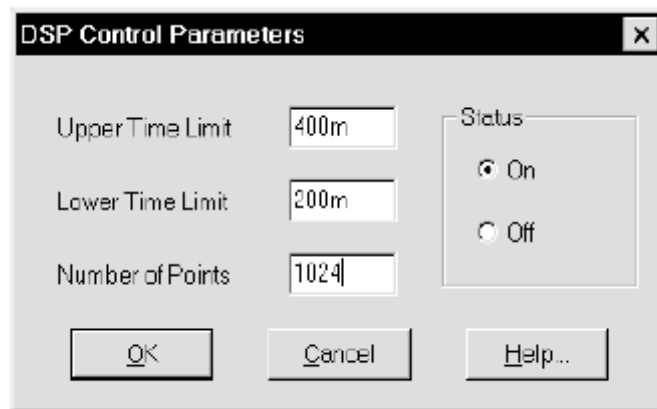
Якщо в *DSP dialog box* режим Off, то:
 в *transient analysis* збільшення $\langle t_{max} \rangle$ зменшує DF. Збільшення N збільшує верхню частоту з діапазону частот (*frequency range*).
 в *AC analysis* збільшення $\langle f_{max} \rangle$ зменшує крок по часу DT. Збільшення N збільшує верхню межу в часовому діапазоні (*time range*).

The Analysis limits dialog box looks like this:

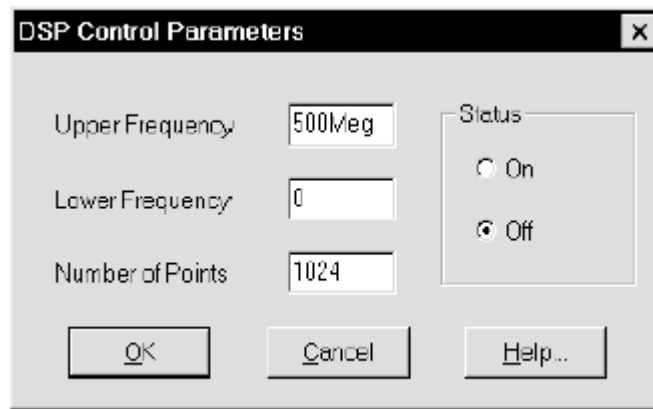


Мал.11 Analysis Limits dialog box для схеми FFT1

Для більш детальної контролю необхідно використовувати діалогове вікно *DSP dialog box*. Для *transient analysis* або *AC analysis* воно має вигляд на мал.12 та мал.13 відповідно.



МАЛ.12 FFT7 TRANSIENT ANALYSIS DSP DIALOG BOX



МАЛ.13 FFT7 AC ANALYSIS DSP DIALOG BOX

Upper Limit (Time or Frequency): Встановлення верхньої межі часу (transient analysis) або частоти (AC analysis).

Lower Limit (Time or Frequency): Встановлення нижньої межі часу (transient analysis) або частоти (AC analysis).

This text field sets the lower limit for time (transient analysis) or frequency (AC analysis) for the analysis window to be sampled. For AC analysis, the lower limit frequency range is fixed at 0Hz.

Number of Points: Кількість відліків. Число має бути рівне степені числа 2: 512, 1024, 2048...

Status: Режим (On – включений, Off – виключений).

Оператори обробки сигналів (Digital Signal Processing Operators)

u та *v* стандартні вирази типу $V(10)$, *S* – спектр.

HARM(u) Harmonics of waveform *u*

THD(S,[F]) Total harmonic distortion of the spectrum *S* as a percentage of the reference frequency *F*.

IHD(S,[F]) Individual harmonic distortion of spectrum *S* as a percent of the value at *F*. Similar to THD but not cumulative.

FFT(u) Forward Fourier transform of waveform *u*

IFT(S) Inverse Fourier transform of spectrum *S*

CONJ(S) Conjugate of spectrum *S*

CS(u,v) Cross spectrum of waveforms *u* and *v*, $CONJ(FFT(v))*FFT(u)*dt*dt$

AS(u) Auto spectrum of waveform *u*, $CS(u,u)$

CC(u,v) Cross correlation of waveforms *u* and *v*, $IFT(CONJ(FFT(v))*FFT(u))*dt$

AC(u) Autocorrelation of *u*, $IFT(CONJ(FFT(u))*FFT(u))*dt$

COH(u,v) Coherence of *u* and *v*, $CC(u,v)/sqrt(AC(u(0))*AC(v(0)))$

REAL(S) Real part of spectrum *S* produced by FFT

IMAG(S) Imaginary part of spectrum *S* produced by FFT

MAG(S) Magnitude of spectrum *S* produced by FFT

PHASE(S) Phase of spectrum S produced by FFT

2.8. Статистичний аналіз по методу Монте-Карло (Monte Carlo Analysis)

При виборі режимів моделювання *Transient*, *AC* або *DC* стає доступним підрежим **Monte Carlo** для розрахунку характеристик кіл при випадковому розкиді параметрів:

Options: Встановлення параметрів методу Монте-Карло (активізується також піктограмою).

Add Histogram: Додавання вікна гістограм (після моделювання).

Delete Histogram: Видалення вікна гістограм.

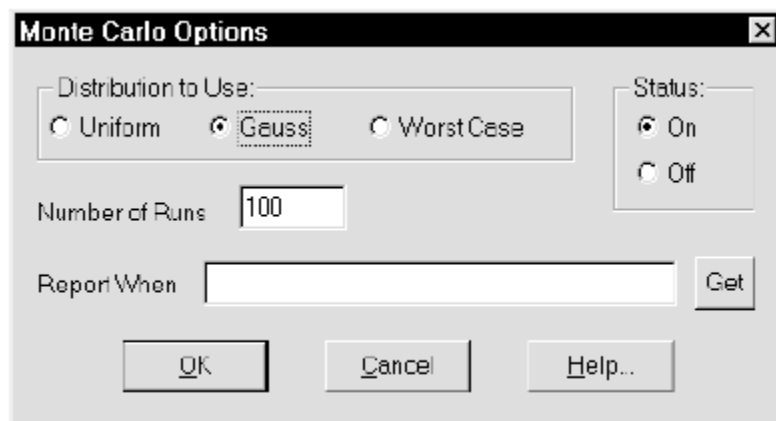
Statistics: Статистична обробка результатів.

Для розрахунку розкиду значень параметрів, які мають розкид LOT і(або) DEV використовуються різні генератори випадкових чисел. Параметри, які мають ознаку DEV (відносну), отримують незалежні випадкові значення, а ті, які мають ознаку LOT (абсолютну) – корельовані випадкові значення в межах параметрів одного елемента. Ключові слова LOT і DEV розміщуються після номінального значення параметру і мають формат:

LOT=<розкид>[%], DEV=<розкид>[%]

Наприклад: MODEL N1 NPN (BF=300 LOT=10%).

Діалогове вікно **Monte Carlo Options** відкривається по команді **Monte Carlo > Options** (див. мал. 14):



Мал.14 Діалогове вікно Monte-Carlo Options

Status: Режим (On – включений, Off – виключений).

Distribution to Use: Характер закону розподілу випадкових параметрів:

Gauss: Гауссовий.
Uniform: Рівномірний.
Worst case: Найгірший випадок.

Number of Runs: Кількість статистичних випробувань.

Report When: Вказується умова, при виконанні якої виводиться попереджувальне повідомлення в текстовий файл результатів моделювання з розширенням *.OUT. Наприклад, умова
`rise_time(V(1),1,2,0.8,1.4)>10ns`
дасть повідомлення коли час наростання $V(1)$ перевищить 10 нс.

Get: Виклик вікна *Get Performance Function dialog box*, де приведені функції для використання в попередній команді.

Подвійне клацання курсором мишки у вікні гістограми відкриває діалогове вікно задання параметрів **Properties**. Після активізації клавіші **Get** в рядку **Function** вказується ім'я функції F (the collaction function) – деякої глобальної характеристики, яка розраховується для кожної реалізації процесу $y=f(x)$. В рядку **Expression** – ім'я характеристики кола y .

На графіку гістограми по горизонтальній вісі відкладається значення характеристики F , по вертикалі – ймовірність в %.

Значення F у всіх реалізаціях виведені у вікні в правій частині екрану.

Внизу справа: *Intervals* – кількість інтервалів розбиття області визначення F . *Low*, *High* – значення її границь.

Внизу зліва розміщується статистична інформація: *Low* – мінімальне значення F , *Mean* – середнє значення, *High* – максимальне значення, *Sigma* – середньоквадратичне відхилення випадкової величини F .

2.9. Режим моделювання Probe

В програмі MC7 передбачений режим **Probe** для створення файлу даних, в який заносяться потенціали всіх вузлів схеми, що дозволяє після завершення моделювання будувати графік довільної змінної.

В цьому режимі екран ділиться на дві частини. Справа розміщується вікно з зображенням схеми, а зліва вікно побудови графіків характеристик. Потім курсором на схемі вказується вузол, вивід компонента або сам компонент – в лівій частині екрану миттєво з'являється його характеристика.

Тип змінних, які відкладаються по осям графіків, вибирається в пунктах меню **Vertical**, **Horizontal**.

Опис всіх команд режиму **Probe** приведений в **Probe menu**:

New Run: (F2) Виконання нового моделювання.

Limits:(F9) Виклик вікна *Analysis Limits dialog box* для редагування параметрів моделювання.

Add Curve: Додати нову криву. Викликається вікно *Add Expression dialog box* для введення нових виразів. Наприклад, ввівши $V_{CE}(Q1)*I_C(Q1)$ отримаємо потужність на колекторі транзистора.

Delete Curves: Знищення графіків змінних, імена яких вказуються додатково у вікні *Delete Probe Plot dialog box*.

Delete All Curves:(CTRL+F9) Знищення графіків всіх змінних.

Separate Analog and Digital: Розміщення графіків аналогових та цифрових змінних в різних вікнах.

One Curve: Побудова тільки одного графіка (утримування клавіші CTRL будує всі графіки).

Many Curves: Побудова декількох кривих.

Save All: Збереження всіх змінних (для побудови характеристик магнітного поля).

Save V and I Only: Збереження значень розрахунків часу, частоти, напруг, струмів та логічних станів цифрових вузлів.

Plot Group: Фіксація групи графіків для вибору розташування наступного графіка.

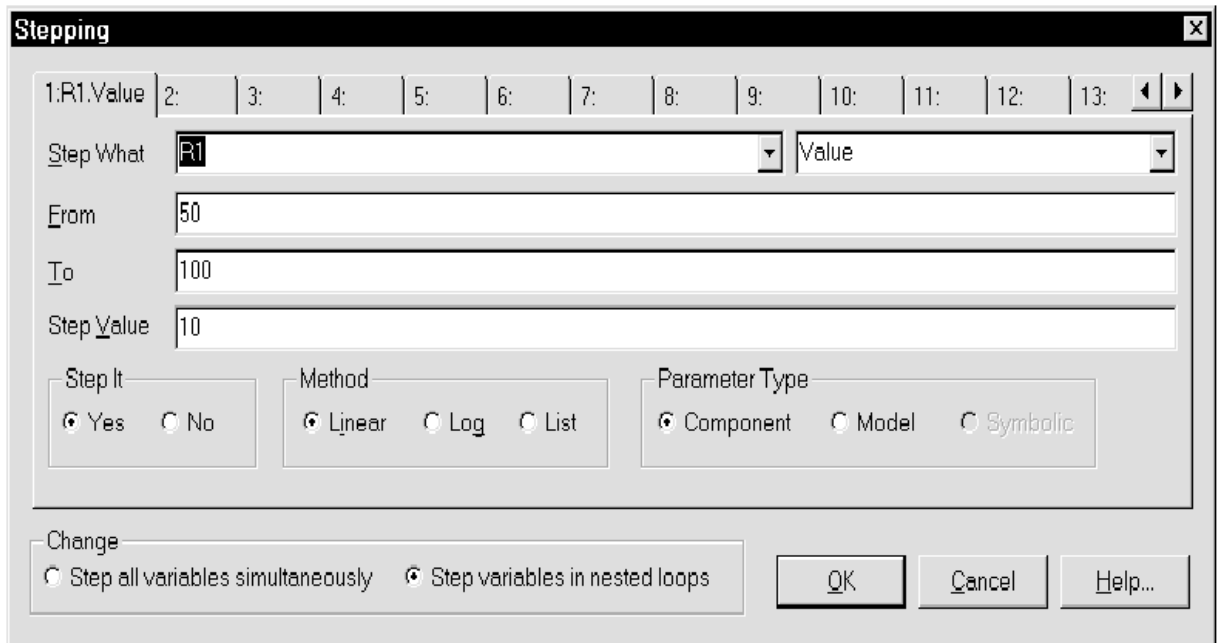
Exit Probe: (F3) Вихід.

F11 – Stepping.

F12 – State Variables Editor.

2.10. Багатоваріантний аналіз (Stepping)

Діалогове вікно **Stepping** (викликається також піктограмою або **F11**) дає можливість проводити варіацію від 1 до 20 параметрів (див. мал.16):



Мал. 15 Діалогове вікно Stepping dialog box

Parameter Panels: Панель введення назв елементів схеми (компонент, модель або символ) для варіювання (від 1 до 20).

Step What: Назва компонента (зліва) та назва його параметра (справа). Зміст цих рядків залежить від вибраного типу елемента.

Parameter Type: Вибір типу елементів схеми:

Component: Відкривається список імен компонентів схеми (наприклад, C1, D2, L6, R3, V9).

Model: Відкривається список імен моделей. Наприклад, зліва можна вказати тип моделі D KD220A (діод), а справа параметр RS (об'ємний опір).

Symbolic: Відкривається список параметрів, визначених по директиві .define або .param.

From: Початкове значення параметру.

To: Кінцеве значення параметру.

Step Value: Величина кроку параметру.

Step It: Включення режиму варіації (*Yes*) або його виключення (*No*).

Method: Характер зміни параметру:

Linear: Лінійна шкала.

Log: Логарифмічна шкала.

List: Список значень.

Change: Метод зміни, якщо вибрані декілька параметрів:

Step all variables simultaneously: Одночасна зміна всіх параметрів, які варіюють.

Step variables in nested loops: Почергова (вкладена) зміна параметрів.

Наприклад:

<u>Nested</u>	<u>Simultaneous</u>
L1=1u C1=1n	L1=1u C1=1n
L1=1u C1=2n	L1=2u C1=2n
L1=2u C1=1n	
L1=2u C1=2n	

В даному режимі криві будуються на одному графіку. Для їх розрізнення використовується опція *Cursor mode + UP ARROW/DOWN ARROW*. Можна утримувати клавішу *ALT* і переключати мишкою криві.

Одночасна варіація параметрів **Stepping** та метод Монте-Карло неможливі.

2.11. МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ (DIGITAL SIMULATION)

Реальні цифрові ІС в програмі *MC7* представлені у вигляді примітивів U_{xxx} , які відображають їх функціонування на логічному рівні, та аналого-цифрових (АЦ) і цифро-аналогових (ЦА) інтерфейсів, які відображають вхідні та вихідні каскади. В завданні на моделювання вказуються тільки примітиви цифрових пристроїв U_{xxx} (як при текстовому опису схеми так і при графічному вводі). Якщо при цьому цифрові ІС з'єднані безпосередньо один з одним, то блоки інтерфейсів до уваги не беруться. Якщо ж до входу або виходу ІС підключений аналоговий компонент, то автоматично включається відповідний інтерфейс. Таким чином змішані кола складаються з компонентів трьох типів: 1) аналогові компоненти; 2) пристрої спряження (інтерфейси); 3) цифрові компоненти (примітиви).

Відповідно є три типи вузлів: 1) чисто аналогові; 2) чисто цифрові; 3) вузли інтерфейсу. Програма *MC7* автоматично розщеплює кожний вузол інтерфейсу на два вузли – чисто аналоговий і чисто цифровий – і включає між ними макромодель АЦ або ЦА інтерфейсу. Крім того, до моделей інтерфейсів автоматично підключається джерело живлення цифрових схем.

Логічні рівні цифрових вузлів приведені в таблиці 1.

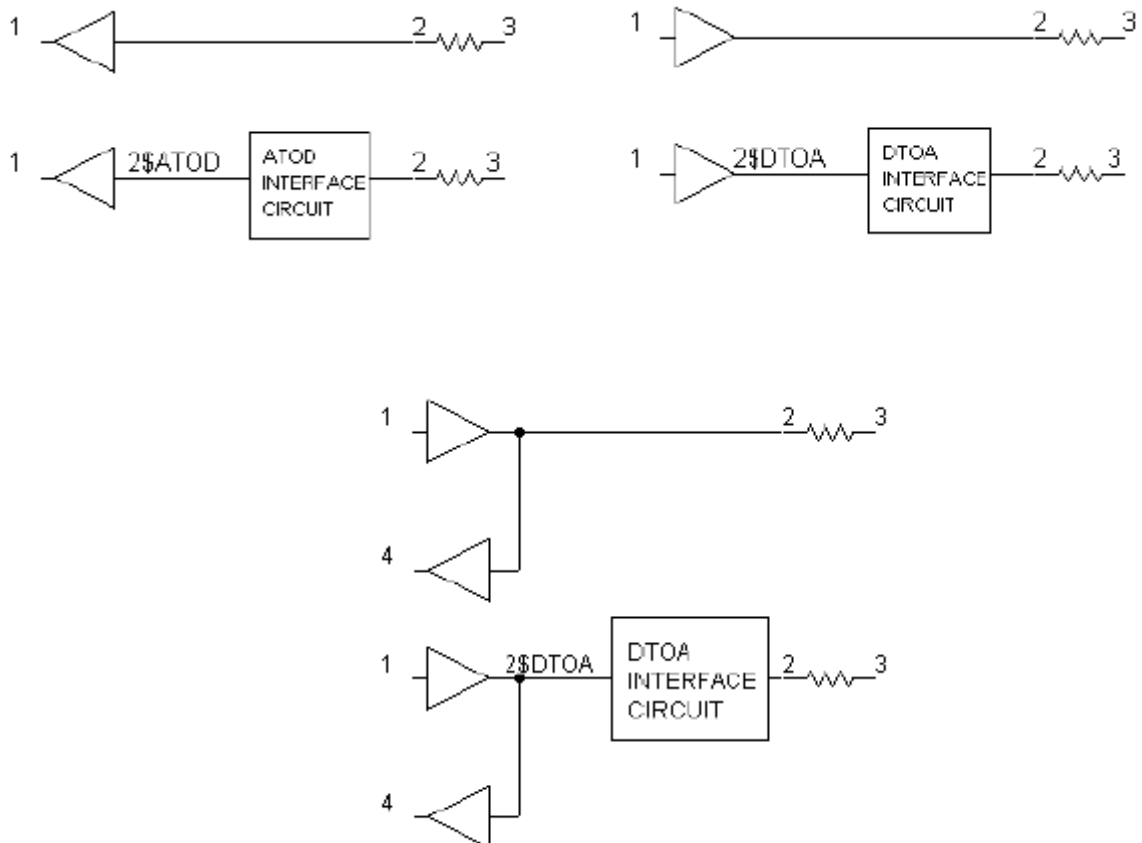
Пристрої інтерфейсу виконують дві функції. По-перше, задають схеми заміщення вхідних та вихідних каскадів цифрових компонентів, з'єднаних безпосередньо з аналоговими компонентами. По-друге, вони забезпечують

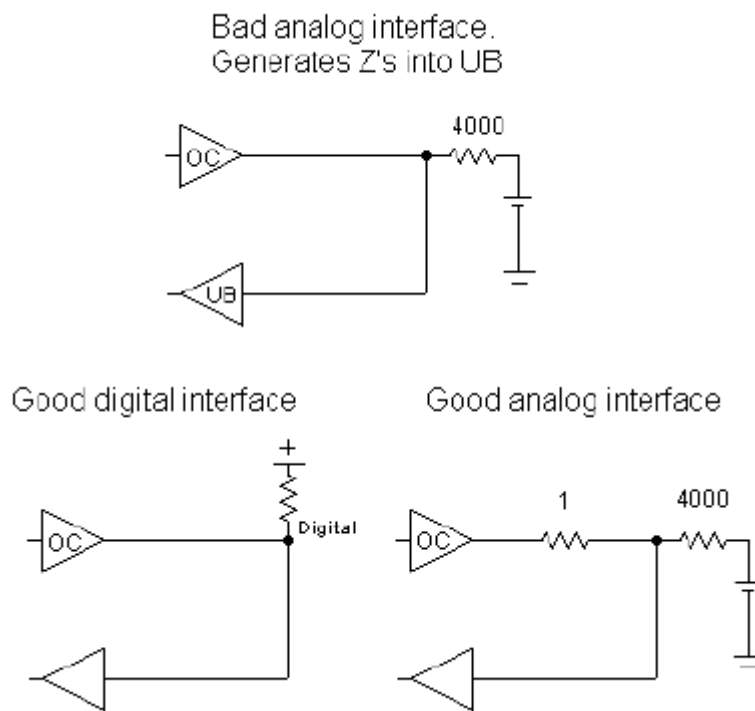
перетворення електричної напруги в логічний рівень і навпаки для забезпечення обміну даними між підпрограмами. Вони підрозділяються на інтерфейси А/Ц (Digital Output) і інтерфейси Ц/А (Digital Input) (див. мал. 17).

State	Description
0	Low
1	High
R	Rising (in transition from 0 to 1)
F	Falling (in transition from 1 to 0)
X	Unknown (level may be 0, 1, or unstable)
Z	High impedance (level may be 0, 1, R, F, X, or unstable)



Таблиця 1 Цифрові стани (Digital states)





Мал.16 Приклади А/Ц та Ц/А інтерфейсів

Основні скорочення характеристик цифрового моделювання:

TP Propagation delay

TW Pulse width

TSU Setup time

THD Hold time

TSW Switching time

MN Minimum

TY Typical

MX Maximum

LH Low to high transition

HL High to low transition

ZL Z to low transition

ZH Z to high transition

LZ Low to Z transition

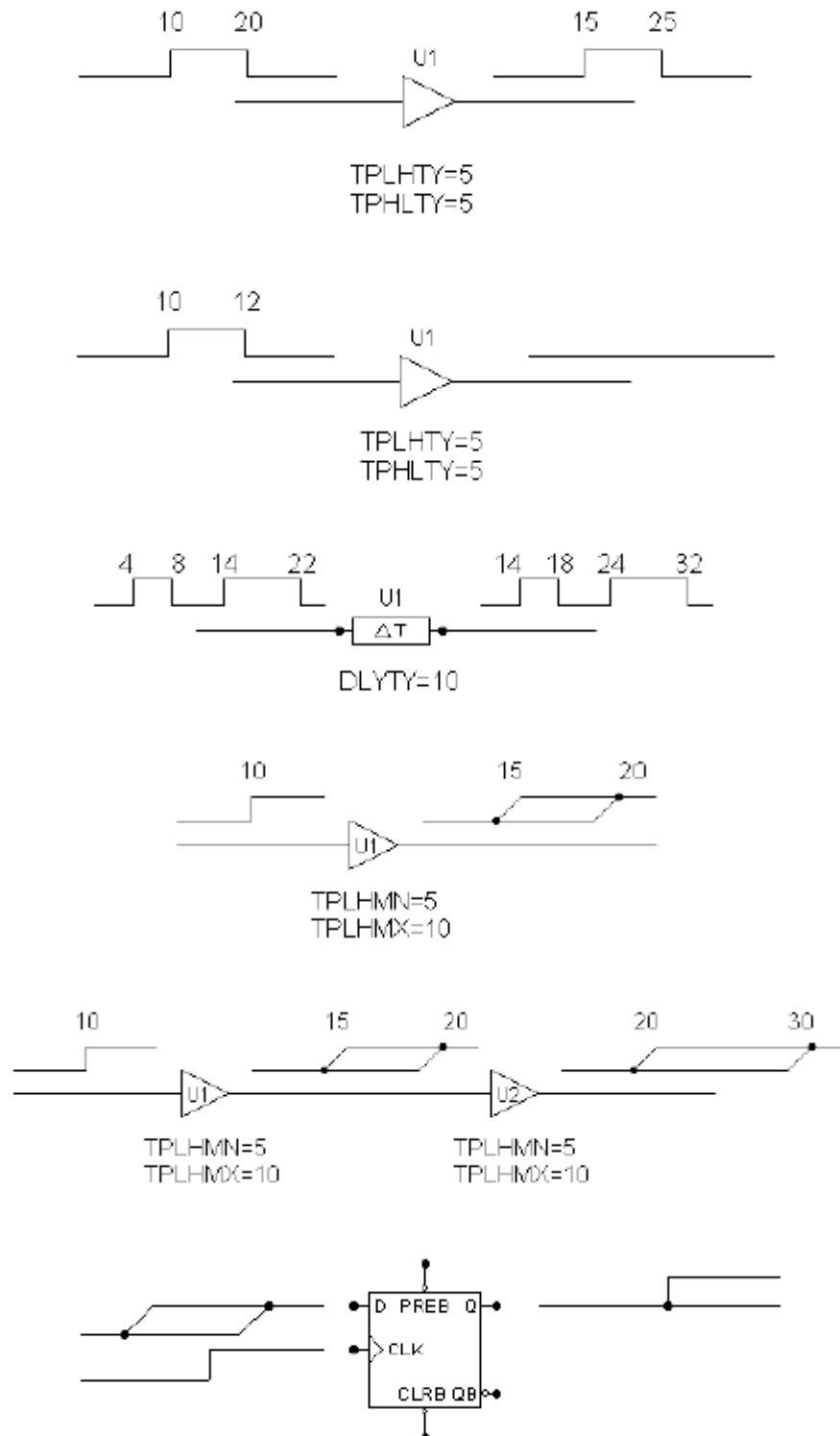
HZ High to Z transition

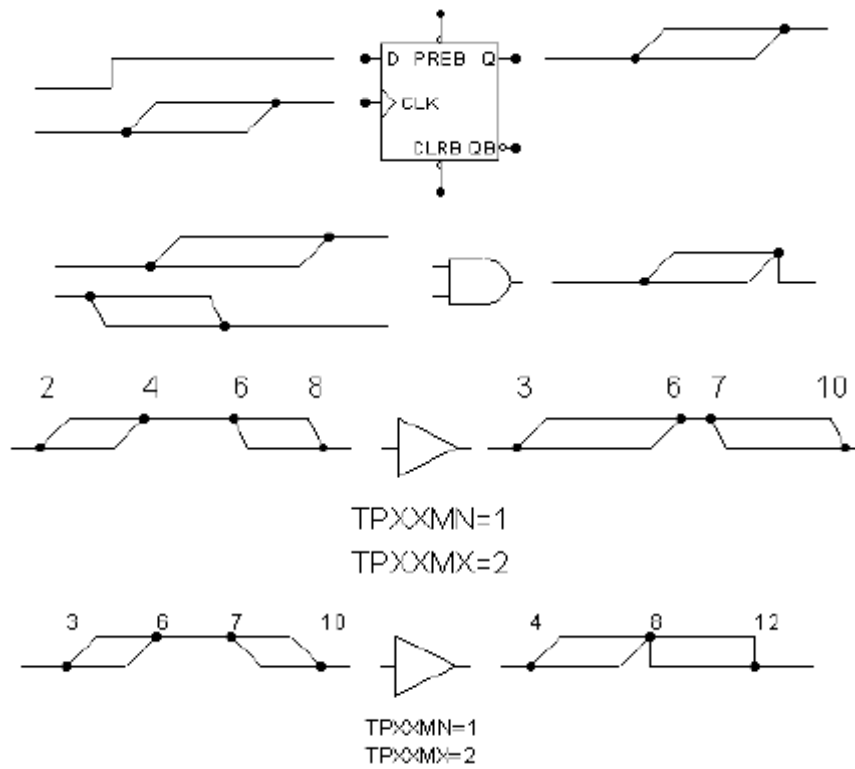
Отже, кожному реальному цифровому компоненту в програмі *MC7* ставиться у відповідність:

- 1) два пристрої інтерфейсу (А/Ц та Ц/А) для спряження з аналоговими пристроями;

- 2) моделі вхід/вихід (*I/O*) для відображення вхідних та вихідних комплексних опорів;
- 3) моделі динаміки, які враховують запізнення сигналів.

Моделі основних цифрових пристроїв приведені на мал.18:





Мал.17 Основні примітивні цифрові пристрої

Цифрові компоненти (примітиви) приведені в наступних таблицях:

Primitive Class	Type	Description
Standard Gates	BUF	Buffer
	INV	Inverter
	AND	AND gate
	NAND	NAND gate
	OR	OR gate
	NOR	NOR gate
	XOR	Exclusive OR
	NXOR	Exclusive NOR
	BUFA	Buffer array
	INVA	Inverter array
	ANDA	AND gate array
	NANDA	NAND gate array
	ORA	OR gate array
	NORA	NOR gate array
	XORA	Exclusive OR gate array
	NXORA	Exclusive NOR gate array
	AO	AND-OR compound gate
	OA	OR-AND compound gate
	AOI	AND-NOR compound gate
	OAI	OR-NAND compound gate

Primitive Class	Type	Description
Tri-state Gates	BUF3	Buffer
	INV3	Inverter
	AND3	AND gate
	NAND3	NAND gate
	OR3	OR gate
	NOR3	NOR gate
	XOR3	Exclusive OR
	NXOR3	Exclusive NOR
	BUF3A	Buffer array
	INV3A	Inverter array
	AND3A	AND gate array
	NAND3A	NAND gate array
	OR3A	OR gate array
	NOR3A	NOR gate array
	XOR3A	Exclusive OR array
	NXOR3A	Exclusive NOR array
Flip-flops / Latches	JKFF	JK negative-edge triggered
	DFE	D positive-edge triggered
	SRFF	SR gated latch
	DLTCH	D gated latch

Primitive Class	Type	Description	
Pullups / Pulldowns	PULLUP	Pullup resistor array	
	PULLDN	Pulldown resistor array	
Delay Lines	DLYLINE	Non-inertial delay line	
Programmable Logic Arrays	PLAND	AND array	
	PLOR	OR array	
	PLXOR	Exclusive OR array	
	PLNXOR	Exclusive NOR array	
	PLNAND	NAND array	
	PLNOR	NOR array	
	PLANDC	AND array plus complement	
	PLORC	OR array plus complement	
	PLXORC	XOR array plus complement	
	PLNANDC	NAND array plus complement	
	PLNORC	NOR array plus complement	
	PLNXORC	NXOR array plus complement	
	Multi-bit Converters	ADC	Multi-bit ATOD converter
		DAC	Multi-bit DTOA converter
Behavioral Models	LOGICEXP	Logic expression	
	PINDLY	Pin-to-pin delay	
	CONSTRAINT	Constraint checker	

	Binary	Octal	Hex
Logic state	0,1	0-7	0-F
Unknown	X	X	X
High impedance	Z	Z	Z
Rising	R	R	None
Falling	F	F	None

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ПЕРЕГЛЯД ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Режим електронної лупи (Scope)

Характер оформлення графіків, представлення на них інформації та команди керування електронним курсором визначається в меню режиму **Scope**:

Delete All Objects: Видалення всіх значень координат, тексту та всіх графічних об'єктів, які були нанесені раніше.

Auto Scale: (F6) Автоматичне масштабування графіків вибраного вікна.

Restore Limit Scales: (CTRL + HOME) Перекреслювання графіків всіх вікон в масштабі закладки *Scale* діалогового вікна *Properties*.

View: Підменю характера відображення інформації:



Data Points: Відображення на графіках розрахункових точок.



Tokens: Нанесення на криві спеціальних значків для полегшення їх розпізнавання.



Ruler: Нанесення розмітки координатних осей замість зображення сітки.



Plus Mark: Нанесення міток "+" в точках перетину ліній сітки.



Horizontal Axis Grids: Нанесення сітки по горизонтальній вісі координат.



Vertical Axis Grids: Нанесення сітки по вертикальній вісі координат.



Minor Log Grids: Нанесення мілкої логарифмічної сітки на довільній вісі координат.



Baseline: Нанесення нульової лінії на вибраний графік.



Horizontal Cursor: Проведення горизонтальної лінії від поточного положення курсора.

Trackers: Керування зображенням координат графіків.

Cursor Functions: Команди переміщення курсорів до характерних точок вибраного графіка (доступні в режимі *Cursor mode*):



Next Simulation Data Point: (*LEFT ARROW* або *RIGHT ARROW*)
Переміщення курсора до наступної мітки даних.



Next Interpolated Data Point: Переміщення курсору до наступної точки інтерполяції.



Peak: (клавіші \rightarrow або \leftarrow) Переміщення курсору до наступного піку.



Valley: Переміщення курсору до наступної впадини (\rightarrow або \leftarrow).



High: Переміщення курсору до максимального значення кривої (\rightarrow або \leftarrow).



Low: Переміщення курсору до мінімального значення кривої (\rightarrow або \leftarrow).



Inflection: Переміщення курсору до наступної точки перегину (похідна графіка міняє знак).



Top: (*ALT+HOME*) Переміщення курсору до найвищої точки сімейства графіків при поточному значенні *X*.



Bottom: (*ALT+END*) Переміщення курсору до найнижчої точки сімейства графіків при поточному значенні *X*.



Global High: Переміщення курсору до найвищої точки сімейства графіків.



Global Low: Переміщення курсору до найнижчої точки сімейства графіків.

Label Branches: Виклик діалогового вікна для нанесення ярликів на кожен криву з сімейства. Дана опція можлива при аналізі Монте-Карло, режимі *Stepping*.

Label Data Points: Виклик діалогового вікна для специфікації розрахункових точок (при *transient*, *AC*, *DC* аналізах).

Керування курсорами: \rightarrow або \leftarrow - лівий курсор, *SHIFT* + \rightarrow або + \leftarrow - правий курсор.



Animate Options: Відкриття діалогового вікна *Animate Options dialog box* для задання параметрів анімації.

Normalize at Cursor: (*CTRL+N*) Нормалізація вибраного графіка (ділення всіх його ординат *Y* на значення ординати *Y* точки графіка, відміченого курсором).



Go to X: (*Shift+Ctrl+X*) Переміщення курсору в точку з заданою координатою по осі *X*.



Go to Y: (*Shift+Ctrl+Y*) Переміщення курсору в точку з заданою координатою по осі *Y*.



Go to Performance: Відкриття вікна *Performance* для побудови залежності цільової функції від варіюємого параметра та переходу в задану точку. Можна виміряти ширину пульсацій, час затухання, період і т.д. і т.п.:

Rise_Time, Fall_Time, Peak_X, Peak_Y, Valley_X, Valley_Y, Peak_Valley, Period, Frequency, Width, High_X, High_Y, Low_X, Low_Y, X_Level, Y_Level, X_Delta, Y_Delta, X_Range, Y_Range, Slope, Phase_Margin.



Go to Branch: Перехід до вибраної вітки сімейства кривих. Вибрані вітки відрізняються кольором.

Tag Left Cursor: (*Ctrl+L*) Нанесення на графік значень координат лівого курсору.

Tag Right Cursor: (*Ctrl+R*) Нанесення на графік значень координат правого курсору.



Tag Horizontal: (*Shift+Ctrl+H*) Нанесення на графік розмірних ліній між точками графіка, відмічених лівим та правим курсорами і представлення відстаней між ними по горизонталі.



Tag Vertical: (*Shift+Ctrl+V*) Нанесення на графік розмірних ліній між точками графіка, відмічених лівим та правим курсорами і представлення відстаней між ними по вертикалі.

Align Cursors: Синхронне переміщення курсору та зчитування координат всіх графіків, розташованих у всіх графічних вікнах.

Keep Cursors on Same Branch: Підтримування переміщення лівого та правого курсорів на одній вітці з сімейства кривих.

Same Y Scales: Перебудова всіх графіків таким чином, щоб вони мали спільну вісь *Y*.



Thumb Nail Plot: Побудова допоміжного вказівного вікна для кращої орієнтації в сімействах кривих.

В колонках нижньої таблиці вікна графіків розташовується наступна інформація:

Left – значення змінної, відміченої лівим курсором,

Right – значення змінної, відміченої правим курсором,

Delta – різниця значень координат курсорів,

Slope – тангенс кута нахилу прямої, яка з'єднує два курсори.

3.2. Режим оптимізації параметрів (Optimizer)

Оптимізація в програмі МС7 здійснюється потужним прямим методом Пауелла.

Всі характеристики, які отримуються під час аналізу і представлені цільовими функціями (див. *Go to Performance*), можна максимізувати, мінімізувати або порівняти.

Приклади містяться в схемах OPT1...OPT4.

Діалогове вікно оптимізації (Optimize dialog box)

Синтаксис процесу оптимізації наступний (див. мал.19):

Find:	Parameter	Low	High	Step	Current	Optimized
Get	R2	10	1e3	100		
Get						
Get						
Get						

That	Performance Function Expression	To	Current	Optimized	Error
Maximizes	- + Get Y_Level(pd(R2),1,1,0)				
None	- + Get				
None	- + Get				
None	- + Get				

Method:
 Standard Powell Stepping Powell

Total Error: 0

Constraints:

Buttons: Optimize, Stop, Apply, Format, Close

Мал.18 Діалогове вікно Optimizer dialog box

Find {Parameter value}
That {Maximizes, minimizes, equates} {Performance function} To {Value}
Using {Standard Powell or Stepping Powell Method}
While {Boolean Constraints}

Find:

Parameter: Вибір параметру для оптимізації.

Low: Нижнє значення параметру.

High: Верхнє значення параметру.

Step: Кількість розрахунків.

Current: Поточне значення параметру (до оптимізації).

Optimized: Оптимізоване значення.

That:

Maximizes, Minimizes, Equates list box: Вибір оптимізаційного критерію.

-: Видалення вказаного критерію з поточного рядка.

+: Додавання критерію в перелік. Змішування критеріїв не допускається.

Get: Вибір цільової функції і параметрів.

Performance Function Expression: Представлення виразу вибраної функції для оптимізації.

To: Оптимізатор буде намагатись досягнути вказаного значення для цільової функції.

Current: Поточне значення параметру (до оптимізації).

Optimized: Оптимізоване значення.

Error: Похибка для вибраного критерію.

Method:

Standard Powell: Стандартний прямиий метод Пауелла.

Stepping Powell: Метод варіювання параметрів від *Low* до *High*, використовуючи *Step*. На кожному кроці використовується стандартний метод для знаходження локального оптимуму. В цьому методі отримуємо найкращий локальний оптимум з *N* можливих.

Total Error: Сума похибок всіх критеріїв.

Constraints: Умови обмеження для оптимізації в Булевих операторах.

Наприклад:

$PD(R1) \leq 100m$

$V(OUT) \geq 1.2$

$VCE(Q1) * IC(Q1) \leq 200m$

Optimize: Початок оптимізації.

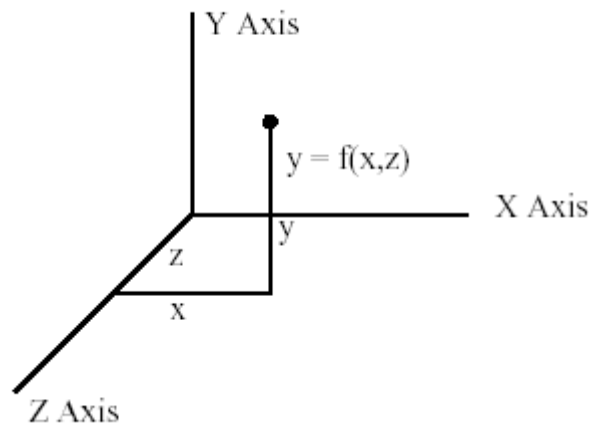
Stop: Припинення оптимізації.

Apply: Модифікація схеми за результатами оптимізації.

Format: Вибір чисельного формату.

3.3. Трьохмірна графіка (3D Graphs)

При реалізації трьохмірної графіки виникає залежність досліджуваної функції (довільного виразу або цільової функції типу *performance* – вісь Y) від двох заданих параметрів (вісі Z та X).



ДІАЛОГОВЕ ВІКНО ТРЬОХМІРНОЇ ГРАФІКИ (3D PLOT PAGE)

Змінні по осях (Axis Variables)

Z Axis: Змінна по вісі Z .

X Axis: Змінна по вісі X (звичайно це час T або частота F).

Temperature: Вибір температури (якщо вона не змінюється по вісі).

Змінна по вісі Y (Y Axis Type)

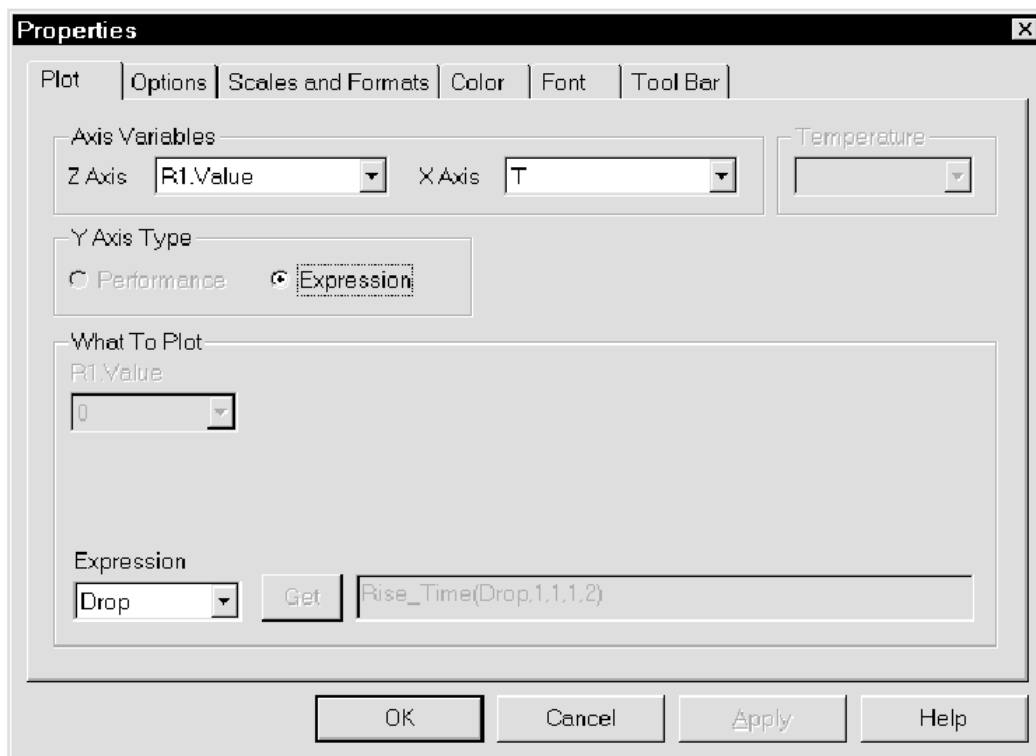
Performance: Вибір в якості досліджуваної функції одну з цільових функцій (*performance functions*).

Expression: Вибір в якості досліджуваної функції довільного виразу.

What to Plot

Top Row : У верхньому вікні перелік змінних, які не вибрані в якості змінних осей і мають діапазон варіації. Необхідно вказати, при якому значенні вибраної змінної потрібно будувати трьохмірні графіки.

Bottom Row: У нижньому вікні перелік виразів (expression) для аналізу – зліва та цільових функцій (performance) – справа.



МАЛ.19 THE PLOT PANEL OF THE 3D DIALOG BOX

Зміна просторової орієнтації трьохмірних графіків (Changing the plot orientation)

Обертання об'ємних графіків здійснюється за допомогою наступних клавіш:

Q: Обертання за годинниковою стрілкою навколо вісі *X*.

A: Обертання проти годинникової стрілки навколо вісі *X*.

W: Обертання за годинниковою стрілкою навколо вісі *Y*.

S: Обертання проти годинникової стрілки навколо вісі *Y*.

E: Обертання за годинниковою стрілкою навколо вісі *Z*.

D: Обертання проти годинникової стрілки навколо вісі *Z*.

X: Вид перпендикулярно до площини $X=0$.

Y: Вид перпендикулярно до площини $Y=0$.

Z: Вид перпендикулярно до площини $Z=0$.

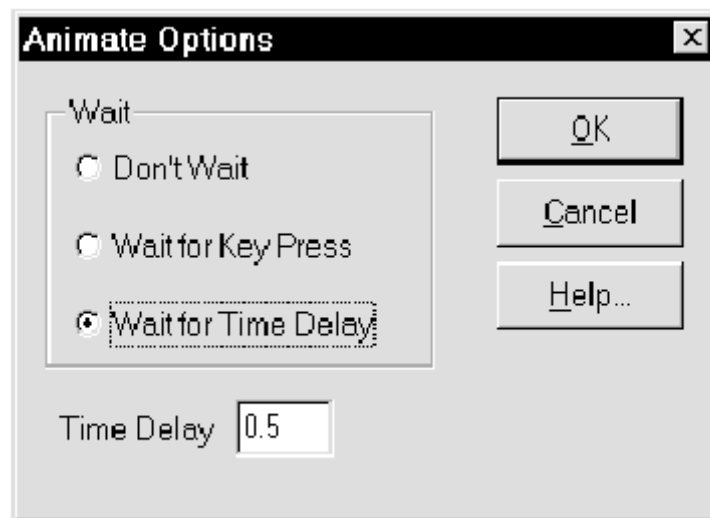
CTRL + HOME: Повернення до початкового вигляду.

C: Вигляд повного контура трьохмірної графіки. Toggles between contour and 3D view.

3.4. Анімаційний режим (Animation)

Режим анімації є одним з варіантів перегляду результатів симуляції. При цьому розраховуються початкові значення аналізу (*transient*, *AC*, або *DC*), потім *Micro-Cap* чекає активізації клавіші або специфічного часу затримки для проведення розрахунків в наступній точці. Таке повільне моделювання дає можливість вносити в схему необхідні зміни.

ВІКНО ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ АНІМАЦІЇ (ANIMATE OPTIONS DIALOG BOX)



МАЛ.20 ANIMATE OPTIONS DIALOG BOX

Задання режиму чекання (Wait)

Don't Wait: Виключення режиму анімації.

Wait for Key Press: Режим анімації через активізацію клавіші.

Wait for Time Delay: Режим анімації з періодом чекання.

Time Delay: Задання часу чекання між розрахунками двох сусідніх точок.

3.5. Представлення чисел, змінних та математичних виразів (Expressions)

ЧИСЛА

F	Femto	1E-15
P	Pico	1E-12
N	Nano	1E-9
U	Micro	1E-6
M	Milli	1E-3
K	Kilo	1E+3
MEG	Mega	1E+6
G	Giga	1E+9
T	Tera	1E+12

Константи та параметри аналізу

Symbol	Value
T	Time in seconds
F	Frequency in Hz
DCINPUT1	Value of Variable 1 in DC analysis
E	$\text{EXP}(1) = 2.718281828$
PI	3.141592653589795
S	Complex frequency = $2 * \text{PI} * J$
J	Imaginary unit value used in complex numbers. For example $1+J$, or $10+23*J$
TEMP	Analysis temperature and default device temperature in degrees Celsius
VT	$1.3806226e-23 * (273.15 + \text{TEMP}) / 1.6021918e-19 = 2.586419e-2$ at $\text{TEMP} = 27$ degrees Celsius
GMIN	Minimum conductance specified in Global settings.
TMIN	Starting transient analysis time
TMAX	Ending transient analysis time
DT	Transient analysis time step
FMIN	Starting AC analysis frequency
FMAX	Ending AC analysis frequency
INOISE	Input noise in AC analysis
ONOISE	Output noise in AC analysis
Analysis	=_Transient in transient analysis

= _AC in AC analysis
 = _DC in DC analysis
 = _DYNAMICDC in Dynamic DC analysis
 = _TF in Transfer Function analysis
 = _SENS in Sensitivity analysis

For example, the expression ANALYSIS=_AC would be true (1.0) in AC analysis and falso (0.0) everywhere else

PGT Total power generated in the circuit
 PST Total power stored in the circuit
 PDT Total power dissipated in the circuit
 EGT Total energy generated by sources in the circuit
 EST Total energy stored in the circuit
 EDT Total energy dissipated in the circuit

Зміст

D(A) Digital state at node A
 V(A) Voltage at node A
 V(A,B) Voltage between node A minus voltage at node B
 V(D1) Voltage across the device D1
 I(D1) Current through the device D1
 I(A,B) Current through the device using nodes A and B
 IR(Q1) Current into the R lead of the device Q1
 VRS(Q1) Voltage across the leads R and S of the device Q1
 CRS(Q1) Capacitance between leads R and S of the device Q1
 QRS(Q1) Charge in the capacitor between leads R and S of the device Q1
 R(R1) Resistance of the resistor R1
 C(X1) Capacitance (in Farads) of the capacitor or diode X1
 Q(X1) Charge (in Coulombs) stored in the capacitor or diode X1
 L(L1) Inductance (in Henrys) of the inductor or core L1
 X(L1) Flux (in Webers) in the inductor or core L1
 B(L1) B field (in Gauss) of the core material of inductor L1
 H(L1) H field (in Oersteds) of the core material of inductor L1
 T Time
 F Frequency
 S Complex frequency = $2*PI*F*j$
 RND Random number generator ($0 \leq RND \leq 1$)
 ONOISE Noise voltage at the output node
 INOISE Noise voltage referred to the input node (ONOISE/gain)
 EG(V1) Energy generated by source V1
 ES(Q1) Energy stored in device Q1
 ED(D1) Energy dissipated in device D1
 PG(V1) Power generated by source V1
 PS(Q1) Power capacitively or inductively stored in device Q1
 PD(D1) Power dissipated in device D1

<i>DEVICE</i>	<i>ABBREV</i>	<i>LEAD NAME</i>
Mosfets	D,G,S,B	Drain, Gate, Source, Bulk
Jfets	D,G,S	Drain, Gate, Source
GaAsfets	D,G,S	Drain, Gate, Source

BJT	B,E,C,S	Base, Emitter, Collector, Substrate
Tran. Line	AP,AM,BP,BM	Plus in, Minus in, Plus out, Minus out

Арифметичні операції

+	Addition
-	Subtraction
*	Multiplication
/	Division
MOD	Modulus (remainder after integer division)
DIV	Integer division

Трансцендентні оператори

x and y are real, z is complex, $z=x+j*y$

SIN(z)	Sine function, z in radians
COS(z)	Cosine function, z in radians
TAN(z)	Tangent function, z in radians
COT(z)	Cotangent function, z in radians
SEC(z)	Secant function, z in radians
CSC(z)	Cosecant function, z in radians
ASIN(z)	Inverse sine function
ACOS(z)	Inverse cosine function
ATAN(z)	Inverse tangent function
ATN(z)	Inverse tangent function
ARCTAN(z)	Inverse tangent function
ATAN2(y,x)	Inverse tangent function = ATN(y/x)
ACOT(z)	Inverse cotangent function
ASEC(z)	Inverse secant function
ACSC(z)	Inverse cosecant function
SINH(z)	Hyperbolic sine
COSH(z)	Hyperbolic cosine
TANH(z)	Hyperbolic tangent
COTH(z)	Hyperbolic cotangent
SECH(z)	Hyperbolic secant
CSCH(z)	Hyperbolic cosecant
ASINH(z)	Inverse hyperbolic sine
ACOSH(z)	Inverse hyperbolic cosine
ATANH(z)	Inverse hyperbolic tangent
ACOTH(z)	Inverse hyperbolic cotangent
ASECH(z)	Inverse hyperbolic secant
ACSCH(z)	Inverse hyperbolic cosecant

LN(z)	Natural Log
LOG(z)	Common log
LOG10(z)	Common log
EXP(z)	Exponential

3.6. Виведення принтер (Printing schematics)

В програмі *MC* на принтери/плотери виводяться креслення схем, графіки результатів моделювання та текстова інформація засобів допомоги.

Print Setup: Вибір типу принтера, розміру та орієнтації паперу.

Print Preview: Попередній перегляд розташування схеми на листах паперу. Опції **Auto** та **User** задають масштаб.

Page: Номер сторінки для друку.

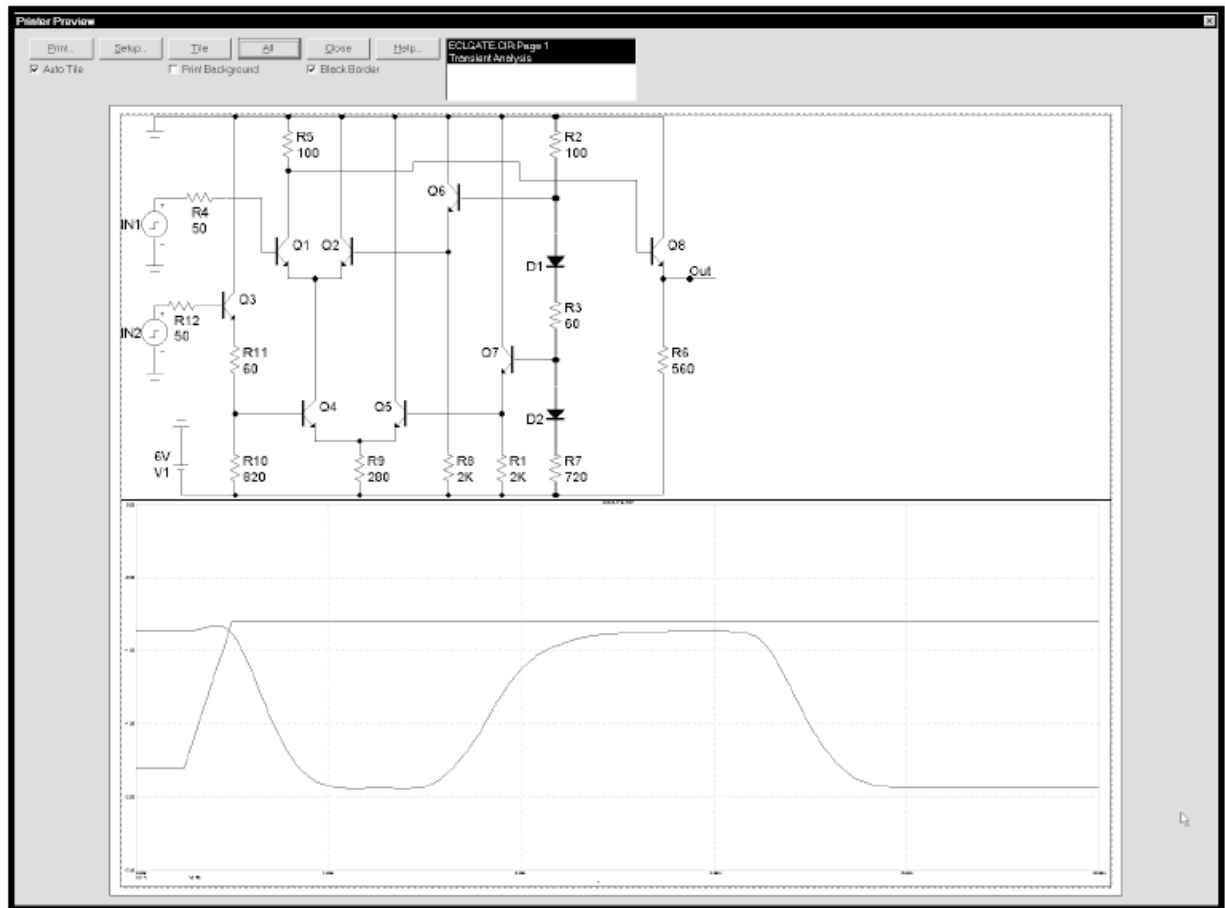
Title Block: Задання параметрів кутового штампу.

Border: Друк навколо схем границь листа.

Black Border: Друк навколо кожного графіка чорної границі.

Header: Друк заголовку (для текстових файлів).

Попередній перегляд перед друком доступний також для графіків результатів моделювання. При цьому на одному листі можна надрукувати креслення схеми та графіки (див. мал.21):



Мал.21 Друк схеми та графіки результатів на одній сторінці

10. Приклади роботи схем програми MultiSim

Приклад 1

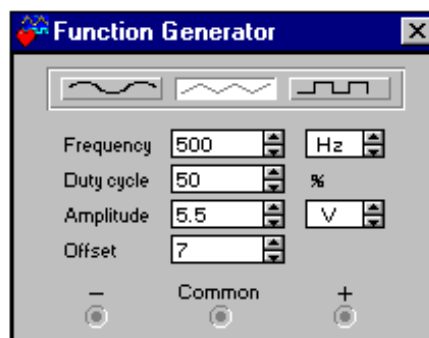
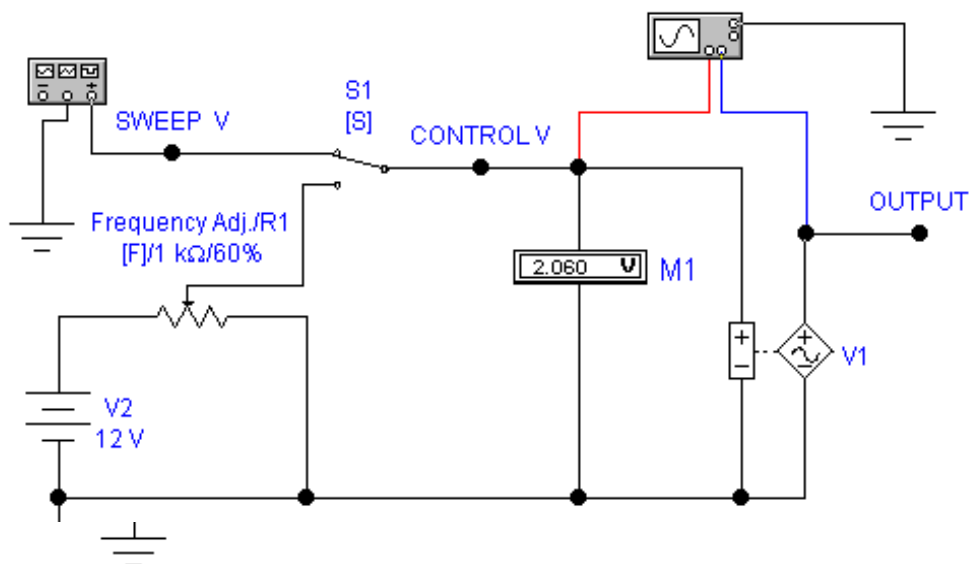
В прикладі показано генератор синусоїдальних коливань з вихідною частотою, що визначається сигналом керуючої напруги.

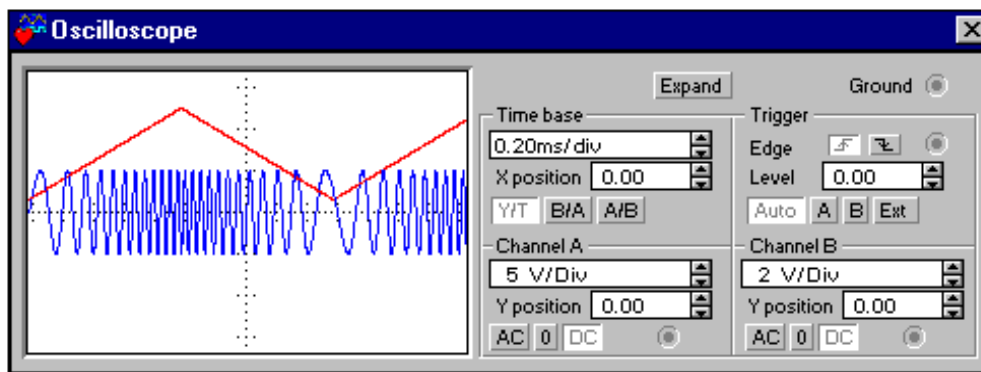
Керуюча напруга може бути постійною і контролюватись потенціометром, так як це має місце у випадку багатьох генераторів сигналу чи частоти. В іншому випадку керуючий сигнал може бути виходом PLL, що дає частоту з чітко визначеним значенням.

Керуюча напруга може бути також неперервною змінною довільної бажаної форми, так як це потрібно для генераторів розгортки чи аналізаторів спектру.

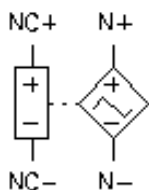
В наведеному нижче прикладі параметри контрольованого напругою генератора встановлені такими, що керуюча напруга в 0 В призводить до генерації сигналу з частотою 100 Гц, а для 12 В ми отримуємо сигнал з частотою 20 кГц.

Керуюча напруга прямокутної форми дає форму частотної маніпуляції (FSK), а синусоїдальна керуюча напруга призводить до частотно-модульованого сигналу.





Voltage-Controlled Triangle Wave Oscillator



Незалежною змінною для генератора коливань трикутної форми є вхідна змінна чи постійна напруга, яка використовується для побудови кусково-лінійної кривої, що описується парами значень (керуюча змінна, частота). З цієї кривої визначається частота для генерації хвилі трикутної форми. Коли використовуються дві координатні пари, виходом генератора є лінійна варіація частоти по відношенню до вхідної керуючої змінної. Коли число використовуваних координатних пар більше двох, виходом генератора буде кусково-лінійна крива. Ви можете збільшити період робочого циклу, а також змінити пікові та мінімальні значення вихідної хвилі трикутної форми, вказавши нові значення **Output peak high value** та **Output peak low value** в діалоговому вікні параметрів моделі.

Приклад 2

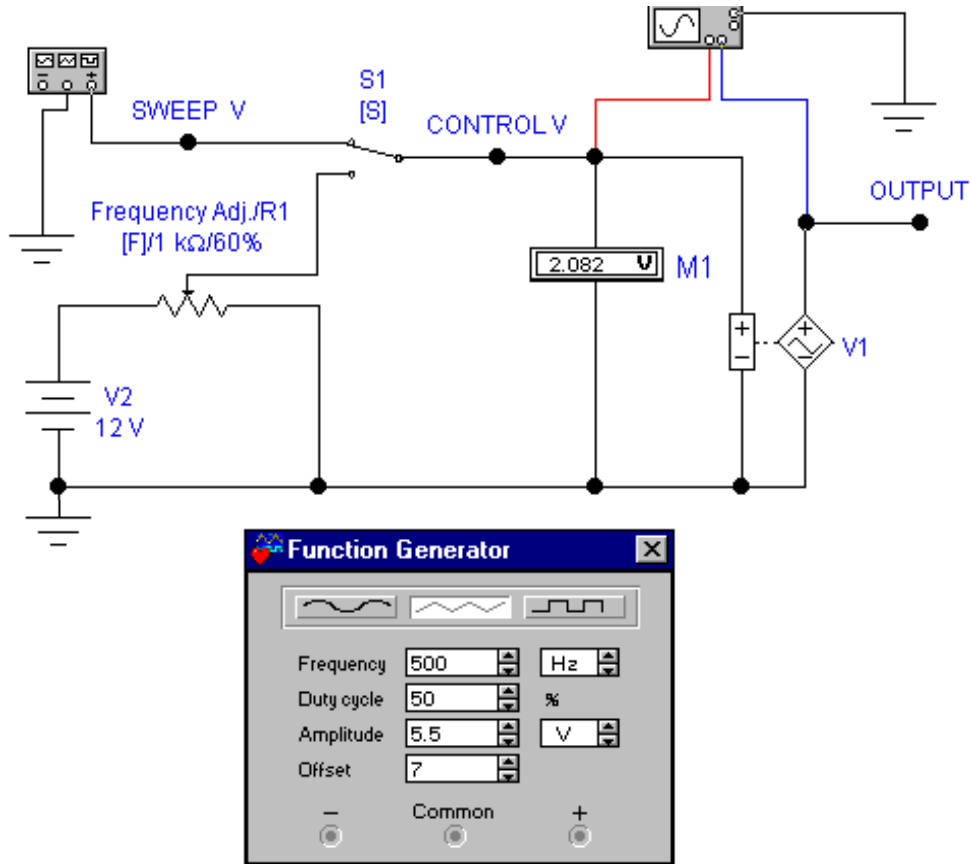
В прикладі показано генератор коливань трикутної форми з вихідною частотою, що визначається сигналом керуючої напруги.

Керуюча напруга може бути постійною і контролюватись потенціометром, так як це має місце у випадку багатьох генераторів сигналу чи частоти.

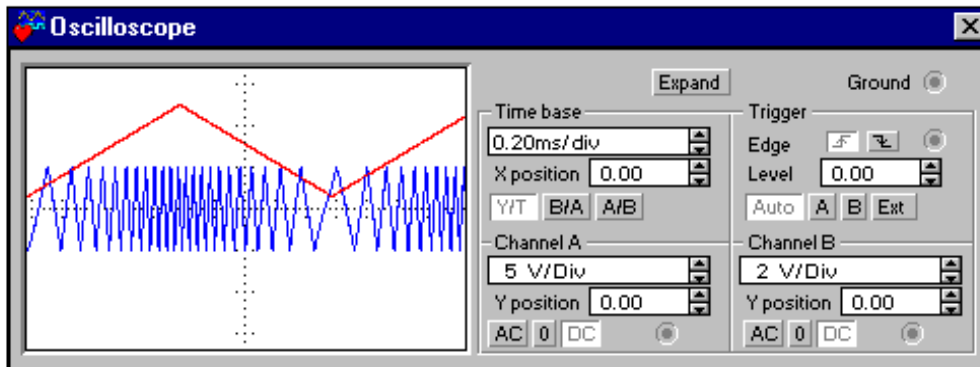
Керуюча напруга може бути також неперервною змінною довільної бажаної форми, так як це потрібно для генераторів розгортки чи аналізаторів спектру.

В наведеному нижче прикладі параметри контрольованого напругою генератора встановлені такими, що керуюча напруга в 0 В призводить до генерації сигналу з частотою 100 Гц, а для 12 В ми отримуємо сигнал з частотою 20 кГц.

Керуюча напруга прямокутної форми дає форму частотної маніпуляції (FSK), а синусоїдальна керуюча напруга призводить до частотно-модульованого

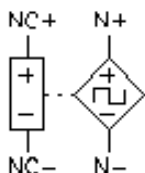


сигналу.



Voltage-Controlled Square Wave Oscillator

Незалежною змінною для генератора коливань прямокутної форми є вхідна змінна чи постійна напруга, яка використовується для побудови кусково-лінійної кривої, що описується парами значень (керуюча змінна, частота). З



цеї кривої визначається частота для генерації хвилі квадратної форми. Коли використовуються дві координатні пари, виходом генератора є лінійна варіація частоти по відношенню до вхідної керуючої змінної. Коли число використовуваних координатних пар більше двох, виходом генератора буде кусково-лінійна крива. Ви можете змінити період робочого циклу, час наростання і час спадання, а також пікові та мінімальні значення вихідної хвилі квадратної форми, вказавши нові значення **Output peak high value** та **Output peak low value** в діалоговому вікні параметрів моделі.

Приклад 3:

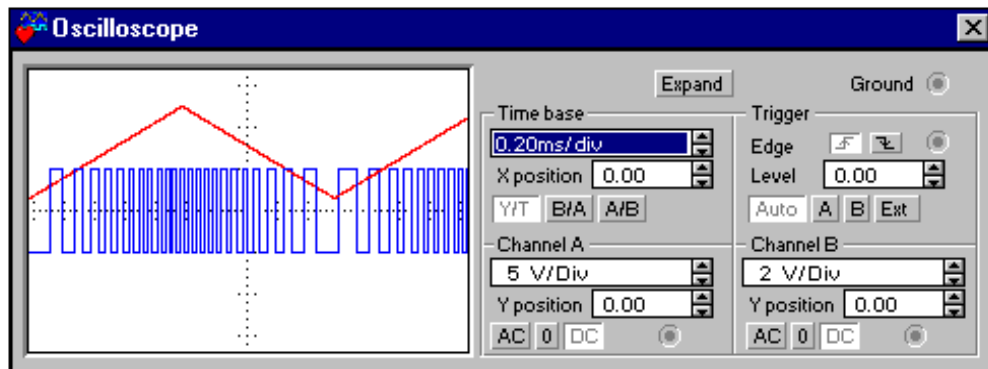
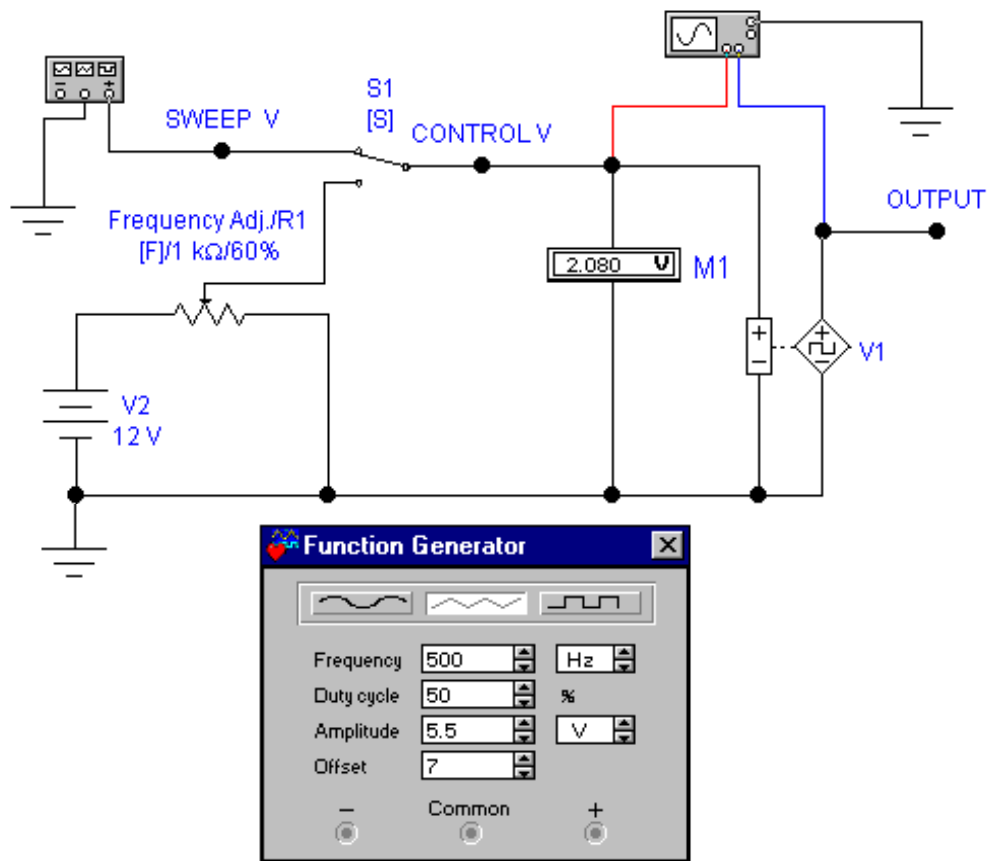
генератор коливань квадратної форми з вихідною частотою, що визначається сигналом керуючої напруги.

Керуюча напруга може бути постійною і контролюватись потенціометром, так як це має місце у випадку багатьох генераторів сигналу чи частоти.

Керуюча напруга може бути також неперервною змінною довільної бажаної форми, так як це потрібно для генераторів розгортки чи аналізаторів спектру.

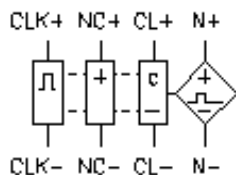
В наведеному нижче прикладі параметри контрольованого напругою генератора встановлені такими, що керуюча напруга в 0 В призводить до генерації сигналу з частотою 100 Гц, а для 12 В ми отримуємо сигнал з частотою 20 кГц.

Керуюча напруга прямокутної форми дає форму частотної маніпуляції (FSK), а синусоїдальна керуюча напруга призводить до частотно-модульованого сигналу.



Controlled One-Shot

Даний компонент є надзвичайно гнучким генератором імпульсів. Незалежною змінною для компонента є вхідна змінна чи постійна напруга, яка використовується для побудови кусково-лінійної кривої, що описується парами значень (керуюча змінна, тривалість імпульса). З цієї кривої визначається тривалість імпульса, і виходом генератора є імпульс саме такої тривалості. Перевстановлюючи відповідні параметри у діалоговому вікні параметрів моделі, ви можете змінити значення частоти видачі імпульсів,



тривалість імпульса, його затримку, час наростання і час спадання, а також пікові та мінімальні значення для імпульса.

Приклад 4:

генератор коливань квадратної форми з вихідною частотою, що визначається сигналом керуючої напруги.

Керуюча напруга може бути постійною і контролюватись потенціометром, так як це має місце у випадку багатьох генераторів сигналу чи частоти.

Керуюча напруга може бути також неперервною змінною довільної бажаної форми, так як це потрібно для генераторів розгортки чи аналізаторів спектру.

В наведеному нижче прикладі параметри контрольованого напругою генератора встановлені такими, що керуюча напруга в 0 В призводить до генерації сигналу з частотою 100 Гц, а для 12 В ми отримуємо сигнал з частотою 20 кГц.

Керуюча напруга прямокутної форми дає форму частотної маніпуляції (FSK), а синусоїдальна керуюча напруга призводить до частотно-модульованого сигналу.

Коли використовуються дві координатні пари, виходом генератора є лінійна варіація імпульса по відношенню до вхідної керуючої змінної. Коли число використовуваних координатних пар більше двох, виходом генератора буде кусково-лінійна крива.

Напруга на виході генератора перемикається в стан з високим рівнем сигналу довільної форми, амплітуда якого перевищує попередньо встановлене порогове значення на вході CLOCK.

Вихідна амплітуда (імпульса), час наростання і спадання можуть бути вибрані так, щоб задовольнити будь-які вимоги.

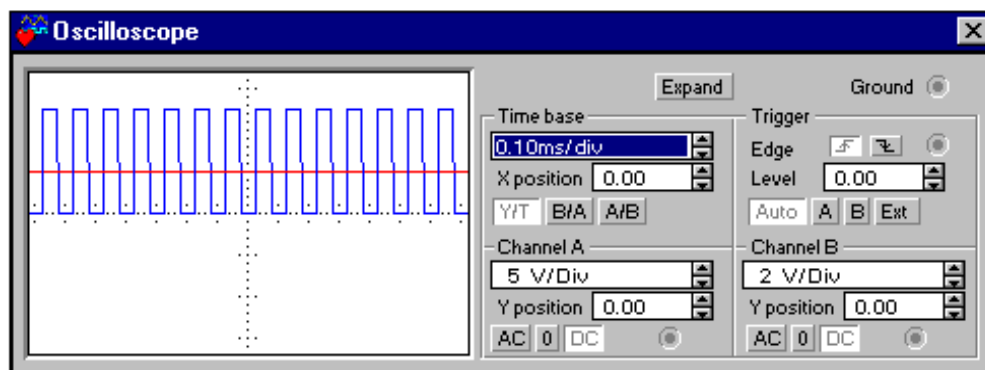
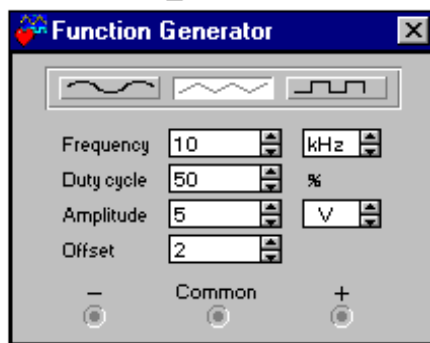
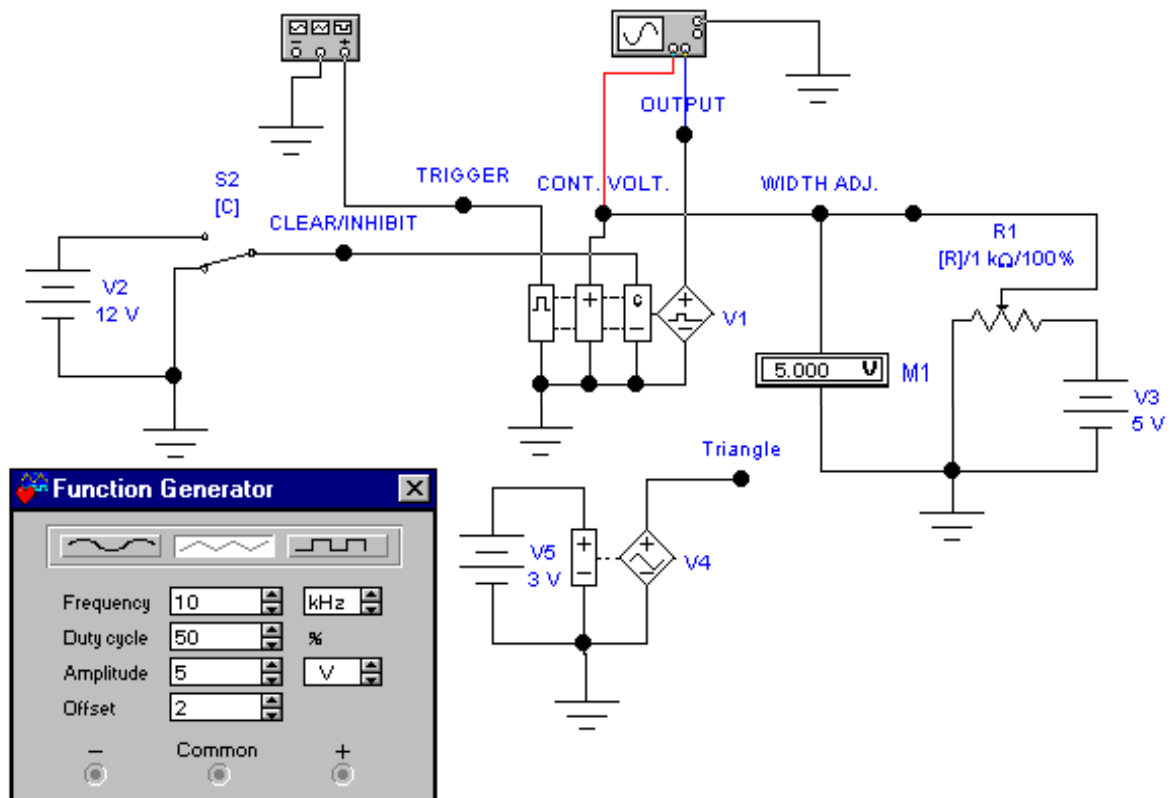
Тривалість імпульса визначається сигналом на вході CONTROL VOLTAGE (+), що може бути як постійним, так і змінної у часі форми.

Потенціометр, який активується при натискуванні кнопки R, або SHIFT-R, дозволяє змінювати керуючу постійну напругу, що регулює тривалість імпульса.

Вхід CLEAR (C) або скидає єдиний імпульс, або, якщо сигнал підтримується на високому рівні, забороняє видачу імпульсів взагалі.

Зміна керуючої напруги призводить до модуляції тривалості імпульсів (PMM).

До складу наведеного нижче прикладу кола включений керований напругою генератор хвилі трикутної форми.



Piecewise Linear Source



Це джерело дозволяє вам керувати формою вихідного сигналу, додаючи пари значень (час, напруга). Кожна пара значень вказує на сигнал від джерела в

конкретний момент часу. В проміжні моменти часу значення сигналу від джерела визначається методом лінійної інтерполяції.

Даний компонент має дві вимірювальні шкали, і, коли під'єднаний до кола, поводить себе як джерело напруги. Таблиця пар значень часу і напруги повинна міститися у вказаному вами файлі. Використовуючи текстові дані з файлу, компонент генерує відповідні значення напруги.

- Щоб скоритатись кусково-лінійним джерелом (PWL source):
 1. Перетягніть його з панелі інструментів **Sources** у вікно кола.
 2. Двічі клацніть на даному компоненті.
 3. Вкажіть на файл, що містить таблицю пар значень (час, напруга).

Специфікація текстового файлу даних

Цей файл повинен містити перелік точок (час, напруга). Кожен рядок цього файлу представляє одну точку у форматі:

Час <пробіл(и)> **Напруга**

Між полями *Час* і *Напруга* ви можете вставити довільне число пробілів. Нижче наведений приклад ідеально відформатованого файлу даних:

0	0
2.88e-06	0.0181273
5.76e-06	0.0363142
1e-05	0.063185
1.848e-05	0.117198

Якщо файл містить ...	Дія
на початку рядка символи, що не є пробілами	рядок ігнорується
нечислові дані після коректно відформатованих даних	числові дані вибираються, нечислові – ігноруються
символи, що не є пробілами, між полями <i>Час</i> та <i>Напруга</i>	рядок ігнорується
пробіли перед коректно введеними даними	числові дані вибираються, пробіли – ігноруються

Особливості

Якщо точка для моменту часу 0.0 не вказана для даного джерела, проміжок часу між 0.0 і першою вказаною точкою все одно буде відпрацьовуватись програмою.

Після досягнення останньої точки, напруга на виході PwL джерела буде залишатися постійною і рівною останньому вказаному у файлі значенню, доки процес моделювання не буде припинено.

Для генерації напруги в проміжках між вказаними у файлі точками, PwL джерело бере значення, отримувані методом лінійної інтерполяції.

Програма здатна працювати з невідсортованими даними. Перед початком процесу моделювання дані з файлу попередньо сортуються по часу.

Якщо ви не вкажете ім'я файла, PwL джерело поведе себе як коротко замкнутий компонент.

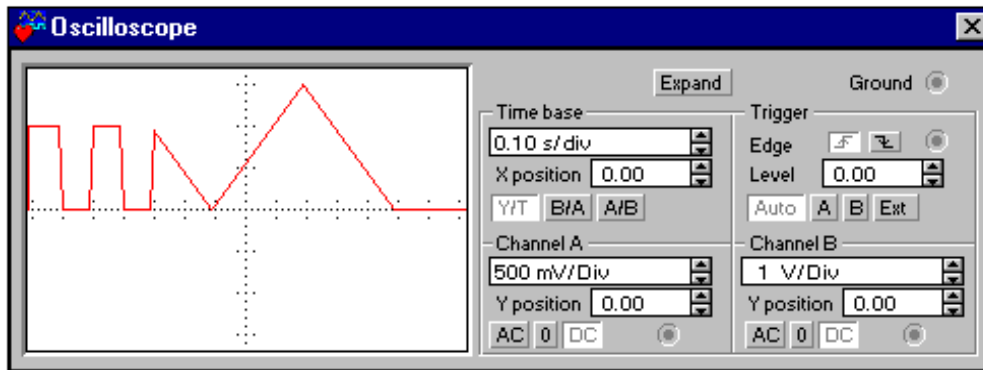
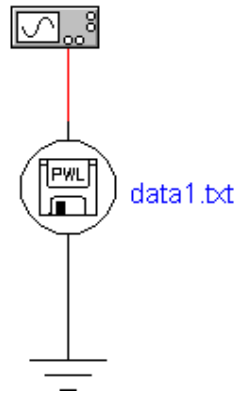
Найлегший шлях для генерації вхідного файла для PwL джерела – захватити дані, скориставшись компонентом **Write Data**. Якщо ви захватите за допомогою **Write Data** напругу більш, ніж для одного вузла, після чого використаєте результуючий файл як відправний для PwL джерела, для генерації напруги ним будуть використані лише дані вузла V1.

Приклад 5

Хвиля, задана у файлі DATA1.TXT, складається з двох циклів прямокутної форми, після яких йде лінійний нахил до 0 В, наростання до значення 1.5 В, яке досягається в момент $t = 0.9$ сек, і спадання до 0 В в момент $t = 1.2$ сек.

Щоб реалізувати цю хвилю, формат файла data1.txt повинен бути таким:

<i>Точка</i>	<i>Час</i>	<i>Напруг</i> <i>a</i>	<i>Коментарі</i>
1	0	0	початок, $t = 0$ сек, $V = 0$ В
2	0	1	в момент часу $t = 0$ сек стрибок до 1 В, край наростання
3	.1	1	напруга 1 В залишається постійною до моменту $t = 0.1$ сек
4	.1	0	напруга спадає до 0 В в момент $t = 0.1$ сек, край спадання
5	.2	0	напруга 0 В залишається постійною до моменту $t = 0.2$ сек
6	.2	1	край наростання
7	.3	1	область постійності напруги $V = 1$ В
так далі			Переглянути і змінити файл можна за допомогою любого текстового редактора.



Write Data

Даний компонент дозволяє вам зберегти результати моделювання у вигляді ASCII файла. Час записується у секундах (час процесу моделювання, а не реальний час), напруги для вузлів реєструються на їх вимірювальних приладах. Вимірювальні засоби пронумеровані у напрямку, вказаному стрілкою на компонентах, відповідно пронумеровані і значення напруги. Щоб задати ім'я файла, двічі клацніть на компоненті.

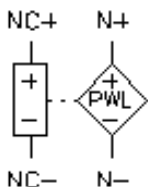
Дані записуються у такому форматі:

Час <пробіл> Напруга1 <пробіл> Напруга2 ... <пробіл> Напруга8

Саме цей формат використовує PWL джерело в процесі своєї роботи. Таким чином, компонент **Write Data** ви можете використати для створення вхідних файлів PWL джерела.

Дивись також розділ:

Piecewise Linear Source Voltage-Controlled Piecewise Linear Source



Дане джерело (кероване напругою кусково-лінійне джерело) дозволяє керувати формою вихідного сигналу. Ви можете ввести до п'яти пар значень (сигнал на вході, сигнал на виході) у діалоговому вікні **Properties**, де вони відображаються як (X,Y)-координати.

X-координата відображає значення вхідного сигналу для даної точки, а пов'язане з ним значення Y є сигналом на виході. Якщо у вас є лише дві пари значень, то вихідний сигнал буде лінійно залежати від сигналу на вході.

За межами координатного відрізка, наявного у файлі, кероване PWL джерело екстраполює криву як пряму з кутлом нахилу, що визначається нахилами на першому та останньому відрізках. Такий підхід, взагалі кажучи, може призвести до того, що сигнал на виході стане нереально великим або малим, особливо, коли вхідні дані за своїми значеннями є великими. Отже, запам'ятайте, що для даного джерела внутрішньо властива відсутність всяких обмежень.

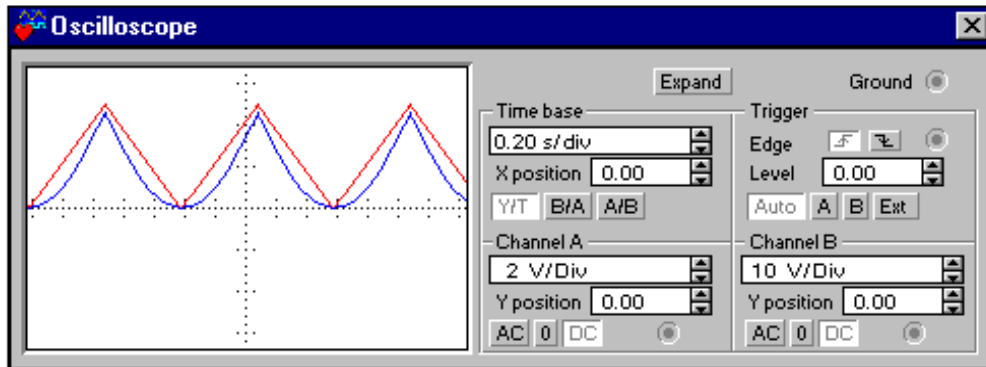
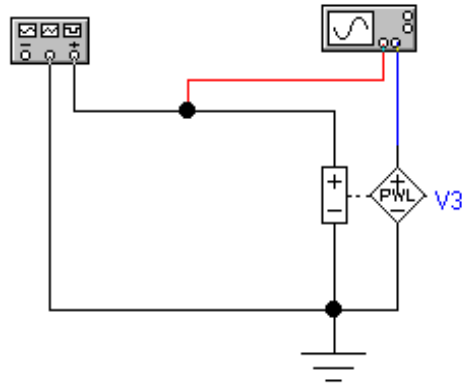
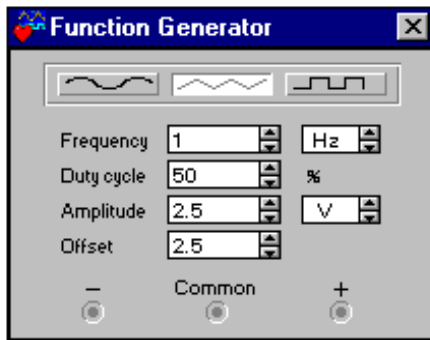
З метою зменшення можливої розбіжності розв'язків при моделюванні, PWL джерело забезпечує згладжування кривих в околах вказаних у файлі точок. Якщо відправний окіл згладжування складає, наприклад, 10%, програма моделювання припускає, що радіус згладжування навколо точки рівний 10% довжини меншого з двох сегментів, що оточують цю точку.

Приклад 6

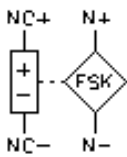
В наведеному нижче прикладі кола хвиля з трикутним профілем, для якої темп наростання і спадання є незмінним, модифікується в параболічну, для якої нахил дотичної в кожній точці зростає.

Координатні пари, що забезпечують таке перетворення:

Перша пара	0,0	(без зміни)
Друга пара	1,1	(те ж саме)
Третя пара	2,4	(нахил зріс на відрізку між цією точкою і попередньою)
Четверта пара	3,9	(нахил зріс знову)
П'ята пара	4,16	(ще більший нахил)



Frequency-Shift-Keying Source (FSK)

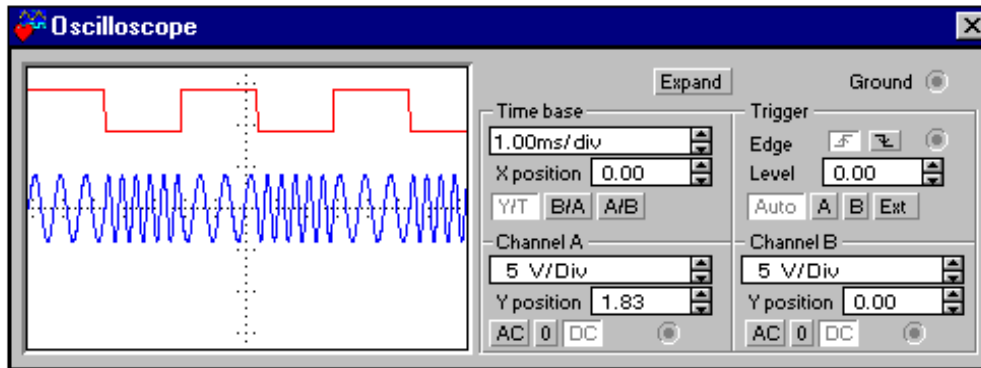
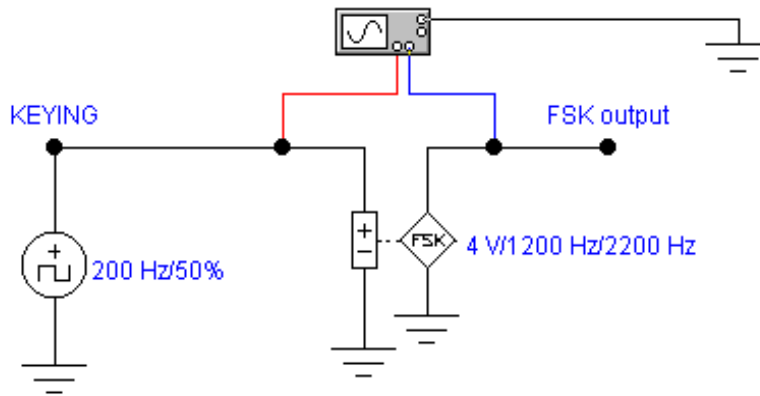


FSK (Джерело частотної маніпуляції) використовується в цифрових комунікаційних системах, таких як низькошвидкісні модеми (наприклад, модем типу Bell 202 – з швидкістю 1200 бод і менше).

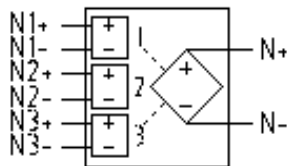
В цій системі високий цифровий рівень позначається як MARK і відтворюється сигналом з частотою 1200 Гц, низький цифровий рівень позначається як SPACE і створюється сигналом з частотою 2200 Гц.

В наведеному нижче прикладі сигналом частотної маніпуляції є хвиля з амплітудою 5 В (TTL) і прямокутним профілем.

Коли вхідний маніпуляційний сигнал має значення 5 В, на виході генерується MARK-сигнал з частотою 1200 Гц. Коли напруга на вході складає 0 В, то на виході маємо SPACE-частоту 2200 Гц.



Polynomial Source



Поліноміальне джерело – це кероване напругою джерело напруги, що характеризується поліноміальною передаточною функцією. Використовуй його для аналогового поведінкового моделювання. В програмі Electronics Workbench поліноміальне джерело може мати максимум три входи для керуючих напруг, а саме, V1, V2 та V3. Напруга на виході визначається з виразу:

$$V_{OUT} = A + B \cdot V1 + C \cdot V2 + D \cdot V3 + E \cdot V1 \cdot V1 + F \cdot V1 \cdot V2 + G \cdot V1 \cdot V3 + H \cdot V2 \cdot V2 + I \cdot V2 \cdot V3 + J \cdot V3 \cdot V3 + K \cdot V1 \cdot V2 \cdot V3$$

у якому

A = Константа

B = Коефіцієнт при V1

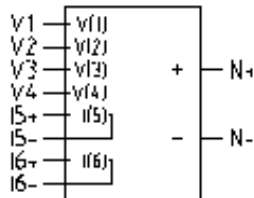
C = Коефіцієнт при V2

D = Коефіцієнт при V3

E = Коефіцієнт при V1*V1

F = Коефіцієнт при V1*V2
 G = Коефіцієнт при V1*V3
 H = Коефіцієнт при V2*V2
 I = Коефіцієнт при V2*V3
 J = Коефіцієнт при V3*V3
 K = Коефіцієнт при V1*V2*V3

Nonlinear Dependent Source



Використовуй це джерело (нелінійне залежне джерело) для створення односигнального джерела, яке імітує поведінку прилада, чи складної системи. Настроюване джерело дозволяє вам, використовуючи математичні вирази, створювати штучні поведінкові моделі. Вирази можуть містити такі оператори:

+ - * / ^ Унарний -

і такі функції:

<i>abs</i>	<i>asin</i>	<i>atanh</i>	<i>exp</i>	<i>sin</i>	<i>tan</i>
<i>acos</i>	<i>asinh</i>	<i>cos</i>	<i>ln</i>	<i>sinh</i>	<i>u</i>
<i>acosh</i>	<i>atan</i>	<i>cosh</i>	<i>log</i>	<i>sqrt</i>	<i>uramp</i>

Функції *u* (функція Хевісайда) та *uramp* (інтеграл функції Хевісайда) використовуються при синтезуванні кусково-лінійних нелінійних функцій.

$$u(x) = \begin{cases} 1 & \text{для } x \geq 0 \\ 0 & \text{для } x < 0 \end{cases}$$

$$uramp(x) = \begin{cases} x & \text{для } x \geq 0 \\ 0 & \text{для } x < 0 \end{cases}$$

Якщо аргумент функцій *log*, *ln* чи *sqrt* стає меншим нуля, використовується його абсолютне значення. Якщо рівними нулю стають дільник або аргумент функцій *log*, *ln*, то виникає помилка.

Для малих сигналів змінного струму поліноміальне джерело веде себе як лінійне залежне джерело з постійним коефіцієнтом пропорційності, рівним похідній від сигналу джерела в робочій точці постійного струму.

Приклади математичних виразів:

$$i = \cos(v(1)) + \sin(v(2))$$

$$v = \ln(\cos(\log(v(1,2))^2)) - v(3)^4 + v(2)^{v(1)}$$

$$i = 17$$

➤ Щоб використати нелінійне залежне джерело:

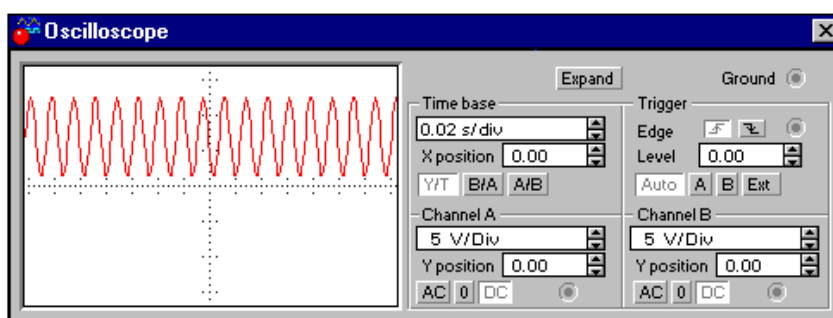
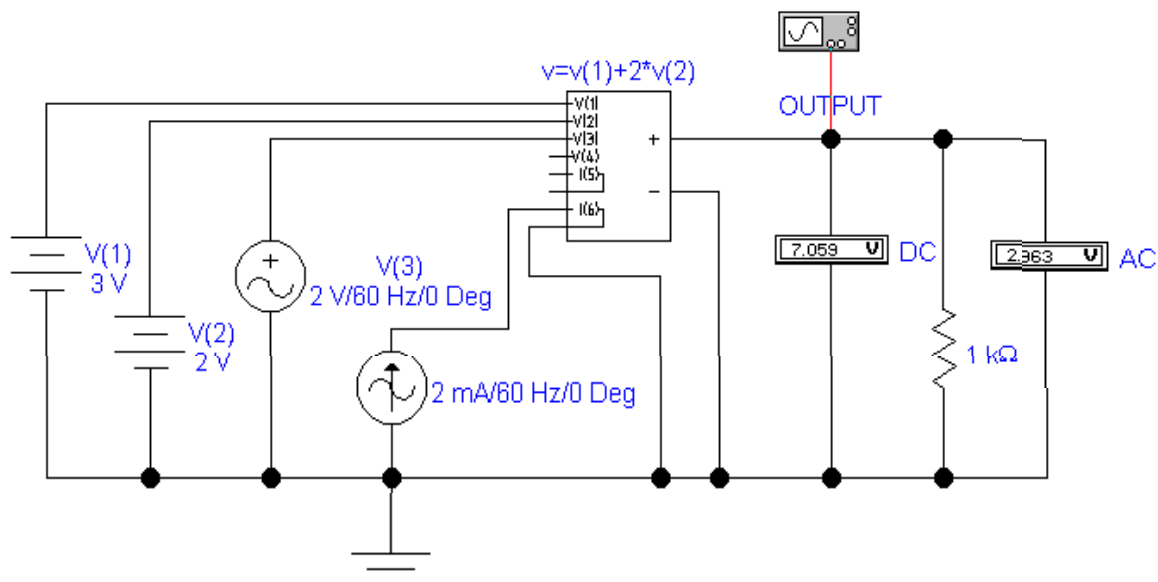
1. Двічі клацніть на компоненті.
2. Введіть з клавіатури алгебраїчний вираз.

Примітка: Якщо залежною змінною є символ “V”, вихідний сигнал буде виражатись у вольтах, якщо ж символ “I” – у одиницях струму.

Постійна і змінна напруга та струм можуть бути включені у вираз для моделювання. У наведеному нижче прикладі сигнали від двох джерел постійної напруги, джерела змінної напруги та джерела змінного струму комбінуються у відповідності з виразом:

$$V_o = V(1) + 2 V(2) + V(3) + (I(6)*1000).$$

Для вказаних вхідних значень і математичного виразу на виході отримуємо постійний сигнал $7V$, змінний компонент складає $4V$.



$u(x)$ та $uramp(x)$

$u(x)$ та $uramp(x)$ можуть використовуватись у поєднанні з іншими заданими (відомими) функціями $f(s)$ як фільтри.

$u(x)$ рівна 1 для всіх $x \geq 0$, і 0 для $x < 0$.

$uramp(x)$ рівна x для всіх $x \geq 0$ (пряма з нахилом 45°), і 0 для $x < 0$.

Наведені дві функції можуть використовуватись у циклах IF–THEN. Наприклад, якщо ви бажаєте проаналізувати функцію $f(x)$ тільки на заданому відрізку по x , ви можете скористатись цими функціями, щоб накласти потрібні обмеження. Вираз $f(x)[u(x)-u(x-2)]$ дозволить вам проаналізувати відому функцію $f(x)$ для всіх x , більших, ніж 0, але менших 2.

11. Приклади тестових екзаменаційних завдань

1. Що таке процес автоматичного проектування ?:

- а) розв'язок математичної моделі схеми з допомогою ЕОМ; б) розв'язок кінцевої послідовності задач певної складності в режимі взаємодії людини та ЕОМ; в) організаційно-технічна система для аналізу роботи фізичних пристроїв з допомогою ЕОМ; г) реалізація певних програм на ЕОМ у взаємодії з користувачем.

2. Назвіть в ієрархічному порядку етапи процесу проектування РЕА:

- а) системотехнічний, схемотехнічний, технічний; б) системотехнічний, технічний, схемотехнічний; в) структурний, схемотехнічний, конструкторський; г) системотехнічний, діагностичний, технологічний.

3. Назвіть складові схемотехнічного проектування:

- а) логічне проектування, моделювання та аналіз схем, технологічне проектування; б) логічне проектування, моделювання та аналіз схем, розробка діагностичних тестів; в) структурне проектування, логічне проектування, моделювання та аналіз схем; г) розробка діагностичних тестів, зовнішнє проектування, логічне проектування.

4. В склад технічного завдання при проектуванні РЕА входять:

- а) виконавчі функції об'єкта проектування, кількісні вимоги до функціональних параметрів, параметри елементів; б) виконавчі функції об'єкта проектування, параметри елементів. в) виконавчі функції об'єкта проектування, кількісні вимоги до функціональних параметрів; г) кількісні вимоги до функціональних параметрів, параметри елементів.

5. Параметри елементів РЕА:

а) вихідні параметри, внутрішні параметри, зовнішні параметри, фазові змінні; б) внутрішні параметри, зовнішні параметри, топологічні змінні, фазові змінні; в) вихідні параметри, компонентні параметри, внутрішні параметри, зовнішні параметри, фазові змінні; г) вихідні параметри, внутрішні параметри, зовнішні параметри, компонентні змінні.

6. Виберіть правильні визначення для параметрів елементів РЕА:

а) компонентні параметри – параметри складових об'єкта; б) вихідні параметри – кількісні показники, які характеризують функцію, виконувану об'єктом; в) фазові змінні – кількісні показники, які характеризують функцію, виконувану об'єктом; г) фазові змінні – величини, які характеризують фізичний або інформаційний стан об'єкта; д) внутрішні параметри – параметри складових об'єкта; е) зовнішні параметри – величини, які характеризують фізичний або інформаційний стан об'єкта; є) топологічні параметри - параметри зовнішнього щодо проектуючого об'єкта середовища; ж) зовнішні параметри – параметри зовнішнього щодо проектуючого об'єкта середовища.

7. Назвіть принципи проектування РЕА:

1. Композиційний; 2. Ітераційний; 3. Диференційний; 4. Алгоритмічний; 5. Ієрархічний; 6. Уніфікації етапів проектування; 7. Контрольованості етапів проектування; 8. Декомпозиційний; 9. Уніфікації задач та складових частин об'єктів; 10. Інтеграційний.

8. Виберіть вірні визначення:

1. Декомпозиційний принцип – а) характеризується етапами (рівнями) проектування; б) розбиття складної задачі на більш прості; в) послідовне наближення до виконання заданих вимог; г) контролює етапи проектування.

2. Ієрархічний принцип – а) послідовне наближення до виконання заданих вимог; б) характеризується етапами (рівнями) проектування; в)

уніфікує складові частини об'єктів проектування; г) розбиття складної задачі на більш прості; г) послідовне наближення до виконання заданих вимог.

3. Ітераційний принцип – а) послідовне наближення до виконання заданих вимог; б) уніфікує задачі проектування; в) характеризується етапами (рівнями) проектування; г) розбиття складної задачі на більш прості.

9. Виберіть режим проектування в САПР, який проходить без втручання людини в ЕОМ:

1. Ручний; 2. Автоматизований; 3. Автоматичний; 4. Пакетний.

10. Дайте вірне визначення автоматичному режиму проектування в САПР:

а) частина проектних процедур виконується вручну, а частина – з допомогою ЕОМ; б) без допомоги ЕОМ; в) за формальними алгоритмами без втручання людини на ЕОМ;

г) вводяться та редагуються тільки вихідні дані для маршруту проектування; д) всі процедури на ЕОМ, але людина втручається в коректування та продовження.

11. Назвіть компоненту забезпечення САПР, яка включає в себе документацію для її реалізації:

1. Математична; 2. Інформаційна; 3. Технічна; 4. Методична; 5. Організаційна.

12. Вкажіть правильні назви для визначень компонентів САПР:

1. Рівень для передачі атрибутів інформації про процес проектування – а) математичне забезпечення; б) організаційне забезпечення ; в) інформаційне забезпечення; г) лінгвістичне забезпечення.

2. Методи та алгоритми проектування – а) методичне забезпечення ;

б) лінгвістичне забезпечення; в) технічне забезпечення ; г) математичне забезпечення.

3. Регламентує взаємовідносини між проектувальниками та комплексом засобів АП – а) технічне забезпечення ; б) методичне забезпечення ; в) інформаційне забезпечення;

г) організаційне забезпечення.

4. Рівень мовних засобів, які перетворюють інформацію в системі – а) математичне забезпечення; б) програмне забезпечення; в) інформаційне забезпечення; г) лінгвістичне забезпечення.

13. З яких елементів складається РЕА після проведення методу схеми заміщення:

а) опори, ємності, індуктивності, джерела струму; б) індуктивності, опори, ємності, джерела напруги; в) ємності, опори, індуктивності, діоди, джерела напруги; г) опори, індуктивності, ємності, д) джерела струму, опори, ємності, індуктивності, джерела напруги.

14. Різницева модель ємності складається з:

а) послідовно з'єднаних опору та джерела струму; б) паралельно з'єднаних опору та джерела напруги; в) послідовно з'єднаних опору та джерела напруги; г) паралельно з'єднаних опору та джерела струму.

15. Різницева модель індуктивності складається з:

а) паралельно з'єднаних опору та джерела струму; б) паралельно з'єднаних опору та джерела напруги; в) послідовно з'єднаних опору та джерела напруги; г) послідовно з'єднаних опору та джерела струму.

16. Схема заміщення діода включає:

а) два опори та дві ємності; б) три ємності та два опори; в) одну індуктивність, одну ємність та два опори; г) один опір та дві ємності; д) два опори та одну ємність.

17. Виберіть правильні групи моделей транзисторів:

а) лінійні статичні; б) лінійні динамічні; в) нелінійні статичні; г) нелінійні динамічні; д) лінійні низькочастотні; е) нелінійні низькочастотні; є) лінійні високочастотні; ж) нелінійні високочастотні.

18. Назвіть пункти порядку складання схеми заміщення при моделюванні РЕА:

1. Вибір параметрів схеми заміщення; 2. Вибір рівнянь для опису схеми; 3. Вибір схеми заміщення для нелінійного елемента; 4. Вибір джерел струму та джерел напруги в схемі; 5. Вибір компонентних та топологічних рівнянь; 6. Вибір системи зовнішніх параметрів; 7. Вибір вузлових потенціалів та контурних струмів; 8. Складання математичної моделі схеми.

19. Нехай досліджувана схема має B – віток, Y – вузлів та K – контурів. Тоді справедливі наступні твердження:

а) маємо B невідомих величин; б) математична модель схеми має B рівнянь; в) маємо $(2*B)$ невідомих величин; г) згідно другого закону Кірхгофа отримаємо $(Y-1)$ рівняння; д) математична модель схеми містить $(Y-1)$ рівняння згідно першого закону Кірхгофа; е) математична модель схеми має $(2*B)$ рівнянь; є) згідно другого закону Кірхгофа отримаємо $B - (Y-1)$ рівняння; ж) згідно першого закону Кірхгофа отримаємо $(Y-1)$ рівняння; з) в математичній моделі схеми маємо B компонентних та $B - (Y-1)$ топологічних рівнянь.

20. В досліджуваній схемі кількість віток $B=7$, а кількість вузлів $Y=4$. Тоді необхідно:

а) використати метод рівнянь Кірхгофа для струмів; б) вибрати в якості незалежних змінних контурні струми; в) використати метод рівнянь

Кірхгофа для напруг; г) вибрати в якості незалежних змінних вузлові потенціали.

21. В досліджуваній схемі кількість віток $B=11$, а кількість вузлів $Y=7$. Тоді необхідно:

а) вибрати в якості незалежних змінних вузлові потенціали; б) вибрати в якості незалежних змінних контурні струми; в) використати метод рівнянь Кірхгофа для струмів; г) використати метод рівнянь Кірхгофа для напруг.

22. Вибрати вірні визначення топологічним поняттям:

1. Граф – сукупність віток, вершин та ребер; 2. Контур – довільний замкнутий шлях у графі; 3. Підграф – довільна сукупність віток і вершин графа; 4. Дерево графа – підграф, який має всі вершини графа, але не має жодного контуру; 5. Ребро – вітка, яка належить до дерева графа; 6. Хорда – вітка, яка належить до дерева графа; 7. Доповнення дерева графа – вся сукупність хорд.

23. Вказати правильні пункти алгоритму отримання топологічної матриці інциденцій та вузлів:

1. Рядками матриці нумерують вузли графа, а стовпцями – вітки; 2. Рядками матриці нумерують вітки графа, а стовпцями – вузли; 3. елементи матриці: +1 – вітка входить у вузол; -1 – вітка виходить з вузла; 4. елементи матриці: +1 – вітка входить у вузол; -1 – вітка виходить з вузла; 0 – вітка та вузол не з'єднані між собою

24. Мета схемотехнічного моделювання:

а) визначення форми й параметрів сигналів струму, які виникають у різних точках схеми; б) розв'язок системи кінцевих рівнянь (тобто без похідних); в) визначення форми й параметрів сигналів струму й напруги, які виникають у різних точках схеми; г) розв'язок системи

диференціальних рівнянь; д) визначення форми й параметрів сигналів напруги, які виникають у різних точках схеми.

25. Метод Ньютона при автоматичному розрахунку статичних схемотехнічних моделей РЕА описується наступним чином:

$$1. \begin{pmatrix} x_1^{(n+1)} \\ x_2^{(n+1)} \\ \dots \\ x_k^{(n+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^{(n)} \\ x_1^{(n)} \\ \dots \\ x_k^{(n)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{dF_1}{dx_1} \dots \frac{dF_1}{dx_k} \\ \frac{dF_2}{dx_1} \dots \frac{dF_2}{dx_k} \\ \dots \\ \frac{dF_k}{dx_1} \dots \frac{dF_k}{dx_k} \end{pmatrix}^{(n)} \times \begin{pmatrix} F_1(x_1^{(n)}, \dots, x_k^{(n)}) \\ \dots \\ F_k(x_1^{(n)}, \dots, x_k^{(n)}) \end{pmatrix} \quad 2. \begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \\ \dots \\ F_k(x_1, \dots, x_k) = 0 \end{cases}$$

$$3. \begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = F_1(\bar{x}, t) \\ \bar{F}_2(x, t) = 0 \end{cases} \quad 4. F\left(\frac{dx}{dt}, \int x dt, x(t)\right) = 0.$$

26. Провідність двополюсника при формуванні матриці вузлових провідностей дає:

1) 4 складових – 2 додатніх, 1 від’ємну і 1 нульову; 2) 2 складових – 1 додатню і 1 від’ємну; 3) 4 складових – 2 додатніх, 2 від’ємних; 4) 2 додатніх складових.

27. Явна форма моделі схеми при автоматизованому розрахунку динамічних схемотехнічних моделей РЕА має вигляд:

$$1. x_{n+1} = x_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(x, t) dt \quad 2. F\left(\frac{dx}{dt}, \int x dt, x(t)\right) = 0 \quad 3. \begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = F_1(\bar{x}, t) \\ \bar{F}_2(x, t) = 0 \end{cases}$$

28. Неявна форма математичної моделі схеми має наступний вигляд:

$$\text{а) } \begin{pmatrix} x_1^{(n+1)} \\ x_2^{(n+1)} \\ \dots \\ x_k^{(n+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^{(n)} \\ x_1^{(n)} \\ \dots \\ x_k^{(n)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{dF_1}{dx_1} \dots \frac{dF_1}{dx_k} \\ \frac{dF_2}{dx_1} \dots \frac{dF_2}{dx_k} \\ \dots \\ \frac{dF_k}{dx_1} \dots \frac{dF_k}{dx_k} \end{pmatrix}^{(n)} \times \begin{pmatrix} F_1(x_1^{(n)}, \dots, x_k^{(n)}) \\ \dots \\ F_k(x_1^{(n)}, \dots, x_k^{(n)}) \end{pmatrix}; \quad \text{б) } \begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0 \\ \dots \\ F_k(x_1, \dots, x_k) = 0 \end{cases};$$

$$\text{в) } \begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = F_1(\bar{x}, t); \\ \bar{F}_2(x, t) = 0 \end{cases}; \quad \text{г) } F\left(\frac{dx}{dt}, \int x dt, x(t)\right) = 0; \quad \text{д) } x_{n+1} = x_n + h * f(x_{n+1}, t_{n+1}) .$$

29. Вказати правильні пункти алгоритму розрахунку неявної форми моделі схеми в базисі вузлових потенціалів:

1. Рівняння компонентів повинні мати вигляд $i = f(U)$; 2. Рівняння компонентів повинні мати вигляд $U = f(i)$; 3. Проводимо операцію дискретизації; 4. Проводимо операцію алгебраїзації; 5. При формуванні вектора струмів кожне з рівнянь для i розглядається як рівняння струму відповідної вітки; 6. При формуванні вектора напруг кожне з рівнянь для u розглядається як рівняння напруги відповідної вітки; 7. При формуванні матриці вузлових провідностей G враховуємо внески ємнісних та індуктивних віток; 8. При формуванні матриці вузлових провідностей G враховуємо внески ємнісних, резистивних та індуктивних віток

30. В схемі заміщення при моделюванні частотних характеристик:

1. Джерела напруги і струму закорочуються; 2. Джерела напруги закорочуються, а джерела струму – розмикаються; 3. Джерела напруги розмикаються, а джерела струму – закорочуються.

31. Допущення автоматизованого проектування РЕА на функціональному рівні:

1. Однонаправленість елементів; 2. Двонаправленість елементів; 3. Розв'язка окремих блоків; 4. Врахування зовнішніх впливів на роботу

блоків; 5. Врахування оберненого зв'язку; 6. Розбиття окремих елементів на ієрархічні блоки.

32. Виберіть з переліку базовий елемент функціональних схем:

1. Джерело напруги;
2. Активний елемент;
3. Безінерційний елемент;
4. Лінійний елемент.

33. Інерційний лінійний елемент має наступну функцію перетворення в часовій області:

$$1. \quad y(j\omega) = k(j\omega) * x(j\omega); \quad 2. \quad y(t) = f\left(\int_0^t x(\tau) * h(t - \tau) d\tau\right); \quad 3.$$

$$y(t) = \int_0^t f(x(\tau)) * h(t - \tau) d\tau;$$

$$4. \quad y(t) = \int_0^t x(\tau) * h(t - \tau) d\tau.$$

34. Інерційний нелінійний елемент спрощено можна представити так:

$$1. \quad \frac{dy_i(t)}{dt} + g_i(y(t)) = \frac{dx_i(t)}{dt} + f_i(x(t)); \quad 2. \quad y(t) = f\left(\int_0^t x(\tau) * h(t - \tau) d\tau\right); \quad 3. \quad \begin{cases} \frac{d\bar{x}}{dt} = F_1(\bar{x}, t) \\ \bar{F}_2(x, t) = 0 \end{cases}.$$

35. Функція перетворення інерційного лінійного елемента в частотній області має вигляд:

$$1. \quad y(t) = \int_0^t x(\tau) * h(t - \tau) d\tau; \quad 2. \quad y(j\omega) = k(j\omega) * x(j\omega); \quad 3. \quad Y(j\omega) = K(j\omega) * X(j\omega);$$

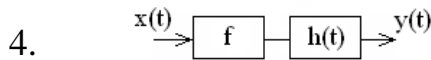
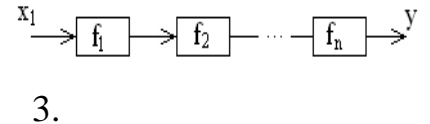
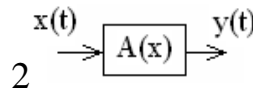
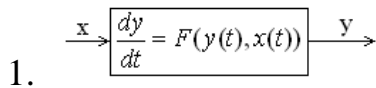
$$4. \quad y(t) = \int_0^t f(x(\tau)) * h(t - \tau) d\tau.$$

36. Вибрати вірне еквівалентне зображення інерційного нелінійного елемента:

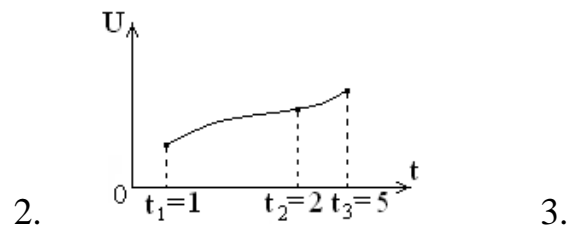
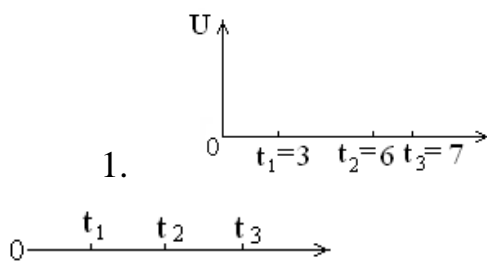
$$1. \frac{dy_i(t)}{dt} + g_i(y(t)) = \frac{dx_i(t)}{dt} + f_i(x(t)); \quad 2. y(t) = f\left(\int_0^t x(\tau) * h(t - \tau) d\tau\right);$$

$$3. y_{i,n+1} = f_i(\alpha_i * y_{i,n+1}; y_{i,n}; x_{n+1}); \quad 4. K_{\text{заз.}}(j\omega) = \frac{\prod_{i=1}^n D K_i(j\omega)}{\left(1 + K_{\text{оз}} * \prod_{i=1}^n D K_i(j\omega)\right)}.$$

37. Вибрати вірне графічне позначення інерційного нелінійного елемента:



38. Вибрати вірне зображення для автоматного часу при структурному проектуванні РЕА:



39. Послідовне з'єднання двох блоків при структурному проектуванні РЕА має назву:

1. Логічна сума; 2. Логічна різниця; 3. Логічний добуток; 4. Інверсний добуток.

40. Вибрати правильні пункти алгоритму представлення комутаційної моделі схеми у вигляді графу:

1. Вводимо два види ребер; 2. Вводимо три види ребер; 3. Елементи множин E, C, V розглядаємо як вершини графа; 4. Елементи множин E, C, V розглядаємо як ребра графа; 5. Сигнальні ребра W визначають належність виводів C до комплексів з'єднань V ; 6. Елементні ребра F визначають належність виводів C до елементів E ; 7. Елементні ребра F визначають належність виводів C до комплексів з'єднань V ; 8. Вводимо два види вершин графа.