

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Запропоновано моделювання елементів аналого-цифрових пристроїв провадити на єдиній теоретичній базі - теорії передавальних функцій. Наведені двовимірні та тривимірні кусково-лінійні моделі найбільш поширених аналогових, аналого-цифрових та цифрових елементів.

© В.О. Багацький, 2002

УДК 681.31.001

В.О. БАГАЦЬКИЙ

ПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

Передавальні характеристики елементів можливо одержати за допомогою вимірювання або комп'ютерних програм моделювання електронних схем.

Результати експериментальних вимірювань звичайно зв'язуються з параметрами вибраної моделі елемента. Моделі аналого-цифрових елементів та деякі їх передавальні характеристики наведені у відповідній літературі [1, 2, 3].

Однак передавальні характеристики елементів, які є в даній літературі, використовуються здебільшого як ілюстративний матеріал та зображуються на двовимірній площині. Між тим більшість елементів має два входи і один вихід та їх характеристики повинні наводитися у тривимірному просторі. Передавальні характеристики моделей аналогових та цифрових елементів у цій літературі не аналізуються.

Існують програмні системи моделювання та проектування аналого-цифрових пристроїв, які використовують сучасні ПЕОМ, наприклад, Design Center та Design Labs [4, 5].

В цих системах моделювання аналогових пристроїв здійснюється за допомогою програми PSpice з складними нелінійними моделями напівпровідникових компонентів типу діода та транзистора. При цьому характеристики пристроїв відображаються досить точно. Розрахунок та моделювання пристроїв базуються на теорії моделювання електронних схем.

Моделювання цифрових пристроїв прова-

диться за допомогою простих моделей цифрових елементів (т.з. "примітивів"), які відображають тільки такі параметри елементної бази, як кількість входів та виходів. Основою цих моделей є таблиці стану та переходів цифрових елементів, або узагальнено, теорія перемикаючих функцій.

Бажано використовувати для моделювання аналогових та цифрових пристроїв єдину теоретичну базу.

Теорія моделювання електронних схем може бути застосована як єдина база для аналізу та проектування всіх типів електронних елементів, у тому числі цифрових. Однак при цьому задача моделювання стає настільки багатомірною, що обмеження існуючих ПЕОМ за об'ємом пам'яті та потужністю не дозволяють виконувати моделювання навіть помірно складних пристроїв.

Таким чином, обмеження моделюючого середовища дозволяють моделювати тільки схеми певної складності. Основна складність може бути зосереджена в Spice моделях елементів, або у великій кількості моделей-"примітивів", які створюють модель складної цифрової схеми в цілому.

Якщо вибрати як єдину теоретичну базу теорію передавальних функцій, то вона, з одного боку, дозволяє враховувати більше параметрів елементної бази, ніж це є в теорії перемикаючих функцій, а з другого боку, вона менш детально відображає параметри аналогових пристроїв, ніж це робиться у PSpice. Окрім того, передавальні функції дозволяють моделювати не тільки електронні пристрої, а й пристрої іншої природи, наприклад, пневматичні або оптичні.

На рис.1 зображені чотири найпростіші ступінчасті передавальні функції однієї змінної (елемент з одним входом та одним виходом). Ці функції характеризують поведінку елемента у всьому діапазоні нормованих вхідних та вихідних значень сигналу. У функцій Z_p та Z_i визначається параметр X_0 "порог спрацювання", в якому функція Z_p переходить з нульового стану в одиничний, а функція Z_i – з одиничного стану в нульовий. Функція Z_p моделює цифровий елемент "повторювач", а Z_i – цифровий елемент "інвертор". Такі передавальні функції можуть мати тільки ідеальні елементи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення у точці X_0 .

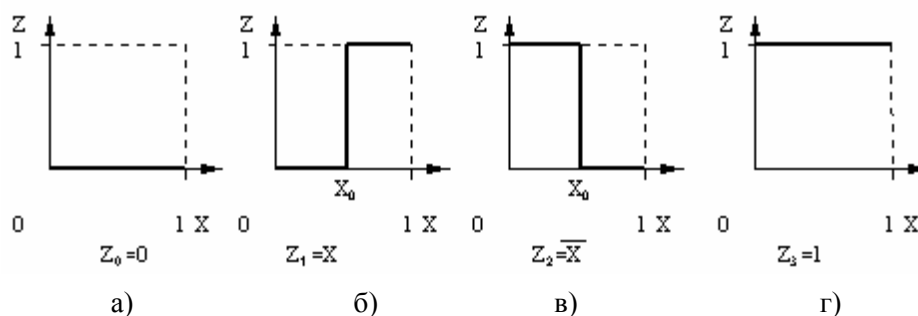


РИС. 1. Ступінчасті передавальні функції однієї змінної

Більш детально властивості елемента з одним входом та одним виходом визначають кусково-лінійні передавальні функції, які складаються з трьох відрізків, попарно обмежених чотирма вузлами (1...4). Функція "повторювач" зображена на рис.2 а), а функція "інвертор" - на рис.2 д). Дані функції здатні характеризувати як цифрові елементи, так і аналогові підсилювачі з прямим та інверсним входами.

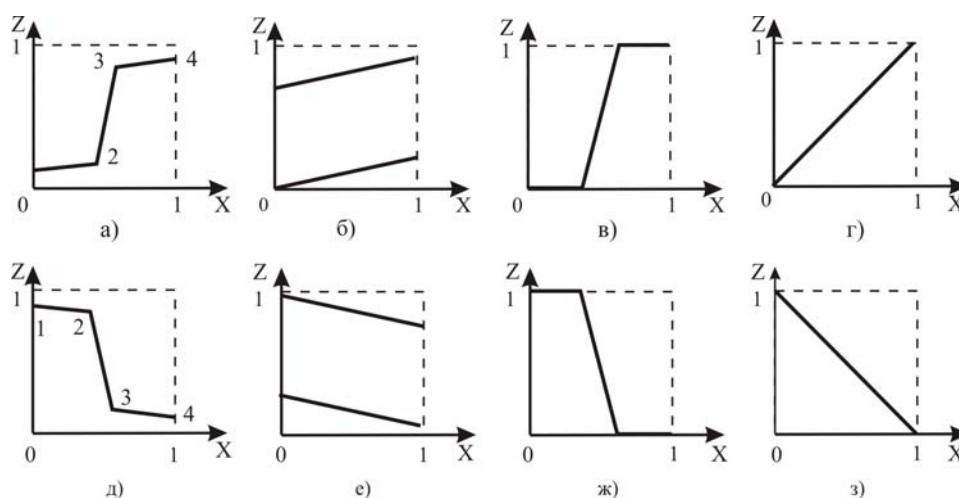


РИС. 2. Кусково-лінійні передавальні функції однієї змінної

Кусково-лінійна функція визначається системою рівнянь

$$Z = \begin{cases} Z_1 + [(Z_2 - Z_1)/(X_2 - X_1)](X - X_1); & X_1 < X < X_2; \\ Z_2 + [(Z_3 - Z_2)/(X_3 - X_2)](X - X_2); & X_2 < X < X_3; \\ Z_3 + [(Z_4 - Z_3)/(X_4 - X_3)](X - X_3); & X_3 < X < X_4. \end{cases}$$

Вирази $(Z_2 - Z_1)/(X_2 - X_1) = K_1$; $(Z_3 - Z_2)/(X_3 - X_2) = K_2$; $(Z_4 - Z_3)/(X_4 - X_3) = K_3$ мають назву коефіцієнтів перетворення і для функції рис.2 а) (повторювач, підсилювач з прямим входом) знаходяться у діапазонах $0 < (K_1, K_3) < 1$; $K_2 > 1$. Коефіцієнти перетворення функції рис.2 д) (інвертор, підсилювач з інверсним входом) лежать у діапазонах $0 > (K_1, K_3) > -1$; $K_2 < -1$.

На середній ділянці передавальної характеристики елемент підсилює модуль вхідного сигналу, а на першій та третій ділянках наближає вихідний сигнал до 0 або 1, тобто формує його як цифровий.

Якщо у передавальній функції рис.2 а) $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ або $X_2 = X_3 = X_4 = 1$, то вона приймає вигляд функції рис.2 б). Така функція може бути у джерела живлення, яке "приймає" струм навантаження. На рис.2 е) зображена передавальна функція джерела живлення, яке "віддає" струм навантаження.

На рис.2 в) та рис.2 ж) передавальні функції відповідають підсилювачам типу rail-to-rail з прямим та інверсним входами.

На рис.2 г) та рис.2 з) у передавальній функції $X_1 = X_2 = 0$; $X_3 = X_4 = 1$. Коефіцієнт перетворення для функції рис.2 г) $K_2 = 1$, що характерно для операційного підсилювача-повторювача або резистора, а для функції рис.2 з) $K_2 = -1$, що відповідає операційному підсилювачу-інвертору.

Такі елементи, як операційний підсилювач, компаратор, аналоговий ключ, аналоговий підсумовувач, а також цифрові логічні елементи мають два входи та один вихід. Тому цілком слушно проаналізувати їх передавальні характеристики у тривимірному просторі.

На рис.3 а) наведена передавальна характеристика операційного підсилювача без зворотнього зв'язку та компаратора аналогових сигналів. На входи прямий X та інверсний Y надходять аналогові сигнали, а на виході Z формується вихідний сигнал, який може бути апроксимований трьома площинами. Вони задаються шістьма вузлами (1...6), кожен з яких визначається трьома числами X_i, Y_i, Z_i , де $i \in 1...6$.

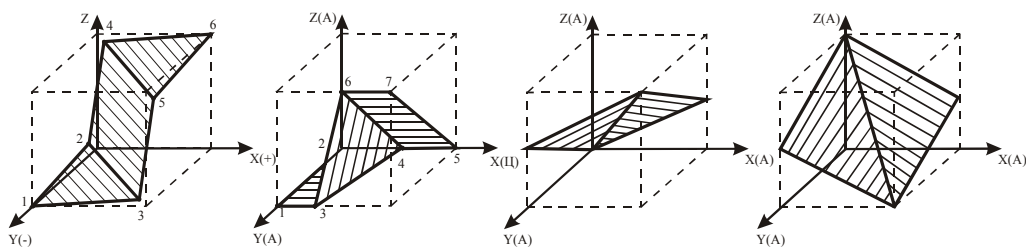


РИС. 3. Кусково-площинні передавальні функції двох змінних ОП та компаратора а), аналогового ключа б), підсумовувачів аналогових сигналів в), г)

У площині з вузлами 1, 2, 3 з $K_1 \ll 1$ вихідний сигнал обмежується рівнем, близьким рівню мінімального негативного сигналу або є логічним нульовим сигналом для компаратора. В площині з вузлами 4, 5, 6 з $K_3 \ll 1$ вихідний сигнал близький до рівня максимального позитивного сигналу або логічним одиничним сигналом для компаратора. На ділянці з вузлами 2, 3, 4, 5 та $K_2 \gg 1$ відбувається підсилення різницевого сигналу $(X - Y)$.

На рис.3 б) зображена передавальна характеристика аналогового ключа, в якого є аналогові вхід Y та вихід Z , та цифровий вхід керування X . Передавальна характеристика визначається сімома вузлами (1...7), кожен з яких описується трьома числами X_i, Y_i, Z_i ; $i \in 1...7$. Якщо вхідний сигнал X знаходиться у межах між вузлами 1, 3, то будь-який сигнал Y практично не проходить на вихід Z ; ступінь проходження можливо вирахувати за положенням площини 1, 2, 3, 4. Для сигналу X у межах між вузлами 6, 7 сигнал Y майже повністю проходить на вихід Z ; похибка проходження вираховується за положенням площини 4, 5, 6, 7. Якщо X лежить у межах між вузлами 3, 4, 6 то вихідне значення Z в залежності від Y визначається положенням площини 3, 4, 6.

На рис.3 в), г) наведені передавальні характеристики аналогових підсумовувачів прямого в) та з інверсією г). Від передавальних характеристик попередніх елементів вони відмінні тим, що діапазони вхідних сигналів дорівнюють одиниці, а діапазон вихідного сигналу порівняно з вхідними дорівнює 2.

На рис.4 наведені ступінчасті передавальні характеристики цифрових елементів з двома входами та одним виходом. Сигнали на входах X, Y та виході Z можуть приймати довільні значення у діапазоні від 0 до 1, поріг спрацювання дорівнює 0,5. Під графічним зображенням кожної передавальної функції розміщено її формульне зображення згідно з перемикаючими функціями, причому знак "x" відповідає кон'юнкції, а знак "+" – диз'юнкції.

Класифікація функцій за геометричними ознаками наведена на рис.5.

Функції Z_0 та Z_{16} типу "плато" дорівнюють відповідно 0 і 1, вони впроваджені в системі функцій однієї змінної.

Функції Z_3, Z_5, Z_{10}, Z_{12} типу "гребінь" фактично є функціями однієї змінної або їх інверсій, вони також впроваджені в системі функцій однієї змінної. Інверсія змінної дорівнює інверсії функції.

Функції Z_1, Z_2, Z_4, Z_8 типу "пік" є об'єм, який виникає на місці перехрещення двох функцій типу "гребінь" та вони відомі як кон'юнкція двох змінних або їх інверсій та мають назву конституенти одиниці. За допомогою кон'юнкції з об'єму 1:1:1 виділяють елементарний об'єм 0,5 : 0,5 : 1.

Функції $Z_7, Z_{11}, Z_{13}, Z_{14}$ типу "яма" відповідають об'єму, який займають дві функції типу "гребінь", відомі як диз'юнкція двох змінних або їх інверсій, та мають назву конституенти нуля. Диз'юнкція дозволяє з часткових об'ємів сформувати один цілісний об'єм.

Функції Z_6 і Z_9 типу "діагональ" відповідає сумарному об'єму двох функцій типу "пік" або перехрещенню двох функцій типу "яма", що визначається як диз'юнкція або кон'юнкція відповідних функцій.

Інверсія функцій типу "пік" відповідає доповненню цієї функції до одиничного об'єму, або однієї з функцій типу "яма", та навпаки. Таким чином, $Z_1=Z_{14}, Z_2=Z_{13}, Z_4=Z_{11}, Z_8=Z_7$.

Функції Z_6 та Z_9 також є інверсією одна однієї.

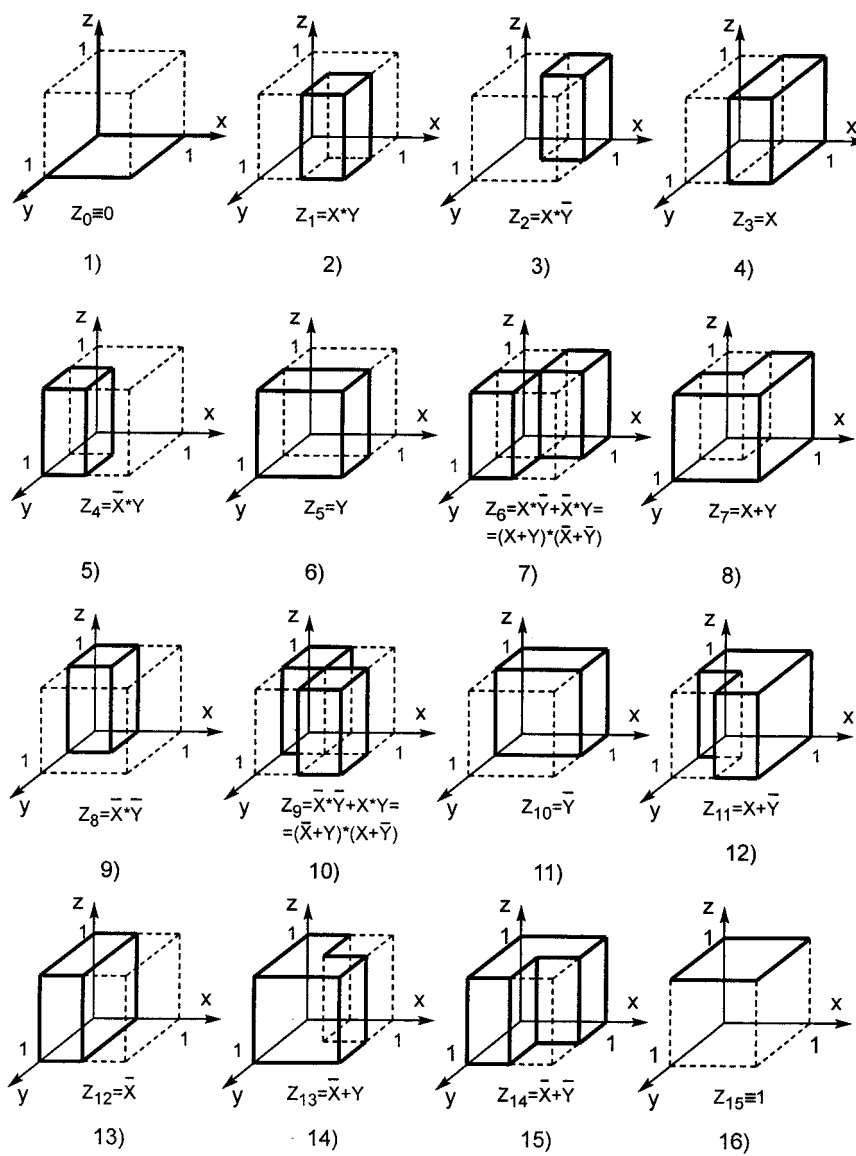


РИС. 4. Ступінчасті передавальні функції логічних елементів з двома входами

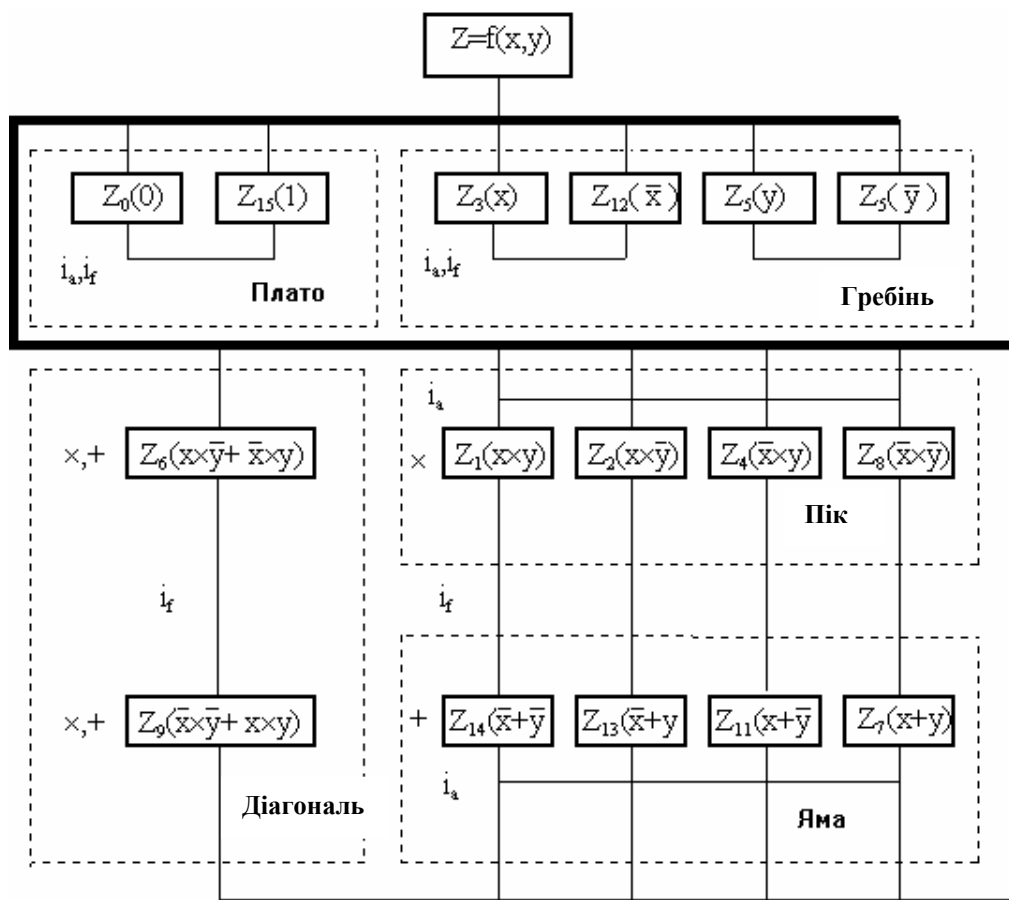


РИС. 5. Класифікація передавальних функцій двох змінних за геометричними ознаками

Якщо комбінувати об'ємні моделі функцій з рис.4, можливо з геометричних міркувань одержати відомі формули для системи функцій: поглинання, склеювання, формули де Моргана.

Питання про функціонально повну систему функцій, яка дозволяє конструювати через них довільну функцію з цього класу або питання про ортогональний базис, вирішено в літературі [6,7]. Найбільш прийнятною для синтезу пристроїв ЕОМ є функціонально повна система функцій, яка складається з диз'юнкції, кон'юнкції та інверсії [7].

В геометричній інтерпретації це означає вичленування елементарного об'єму (кон'юнкція) та об'єднання цих об'ємів (диз'юнкція) довільних функцій та доповнення довільної функції до одиничного об'єму.

З рис.5 витікає, що диз'юнктивні та кон'юнктивні функції зв'язані між собою інверсією. Інверсія, в свою чергу, є окремим випадком кон'юнктивної функції

Z_8 (стрілка Пірса) або диз'юнктивної функції Z_{14} (штрих Шефера), який реалізується при $X=Y$.

Таким чином, симетричні по відношенню до інверсії двох змінних функції Z_8 та Z_{14} самі є кожна ортогональним базисом для всіх 16 логічних функцій двох змінних.

Передавальні характеристики елементів, які реалізують перелічені 16 логічних функцій, можливо апроксимувати не тільки ступінчастими, а й кусково-площинними функціями, як це зроблено для аналого-цифрових елементів.

Висновки

1. В роботі запропоновано провадити розрахунок та моделювання аналого-цифрових пристроїв на основі єдиної теоретичної бази, а саме теорії передавальних функцій.

2. Моделі аналого-цифрових, аналогових та цифрових елементів у вигляді кусково-лінійних передавальних функцій з одного боку, набагато простіші, ніж їх Spice моделі, а з другого боку, дозволяють брати до уваги значно більше параметрів елементної бази, ніж це є у моделях-"примітивах" цифрових елементів.

3. Наведені тривимірні моделі передавальних функцій компаратора, аналогового ключа, операційного підсумовувача та цифрових логічних елементів з двома входами.

4. Виконана класифікація передавальних функцій логічних елементів з двома входами за геометричними ознаками.

1. *Гитис Э.И.* Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. – М.: – Энергия, 1975. – 448 с.
2. *Микроэлектронные* цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / В.Б. Смоллов, В.П. Угрюмов, В.К. Шмидт и др. – Л.: Энергия, 1976. – 336 с.
3. *Преобразователи* формы информации для малых ЭВМ / А.И. Кондалев, В.А. Багацкий, В.А. Романов, В.А. Фабричев – Киев: Наук.думка, 1982. – 312 с.
4. *Гаврилов Л.* Системы автоматизированного проектирования (САПР) аналоговых и аналого-цифровых устройств. – М.: Электронные компоненты. – 2000. – №3. – С.61- 66.
5. *Разевиг В.Д.* Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (Pspice). – М.: СК Пресс, 1996. – 272с.
6. *Глушков В.М.* Синтез цифровых автоматов. – М.: Физматгиз, 1962. – 476 с.
7. *Вавилов Е.Н., Портной Г.П.* Синтез схем электронных цифровых машин. – М.: Сов. радио, 1963. – 440 с.

Одержано 01.07.2002