

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 681.31.001

В.О. БАГАЦЬКИЙ, О.В. БАГАЦЬКИЙ

Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України

МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

Анотація: Запропоновано моделювання аналогових та цифрових елементів аналого-цифрових пристроїв проводити на єдиній теоретичній базі - теорії передатних функцій. Виконана класифікація елементів з двома входами за формами представлення сигналів на входах та виході. Наведені двовимірні та тривимірні кусково-лінійні моделі найбільш поширених аналогових, аналого-цифрових та цифрових елементів.

Постановка проблеми

В існуючих програмах автоматизації проектування типу Spice аналогові пристрої моделюються на макрорівні [1] з використанням складних нелінійних моделей напівпровідникових компонентів типу транзистора та діода. Розрахунок та моделювання пристроїв базуються на теорії моделювання електронних схем, що дозволяє виконувати розрахунки параметрів пристроїв досить точно.

В тих самих програмах моделювання цифрових пристроїв проводиться на логіко-функціональному рівні [1] за допомогою простих моделей цифрових елементів (т.з. «примітивів»), які відображають тільки такі параметри елементної бази, як стан сигналів на входах та виходах елементів, кількість входів та виходів. Основою цих моделей є теорія перемикаючих (булевих) функцій.

Теорія моделювання електронних схем на макрорівні може бути застосована для аналізу та проектування як аналогових, так і цифрових пристроїв. Однак при цьому задача моделювання стає настільки багатовимірною, що обмеження людини-проектувальника та існуючих ПЕОМ за потужністю не дозволяють виконувати моделювання навіть помірно складних аналого-цифрових пристроїв.

Для проектування аналого-цифрових пристроїв на логіко-функціональному рівні бажано використовувати єдину теоретичну базу, яка би дозволяла більш детально моделювати цифрові елементи, та менш детально – аналогові елементи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В системах наскрізного проектування цифрових та аналогових пристроїв та систем [2, 3] існує можливість моделювання аналого-цифрових пристроїв. Для цього використовуються два типи особливих елементів: аналого-цифровий та цифро аналоговий інтерфейси (АЦІ та ЦАІ), які відображають вхідні та вихідні каскади цифрових елементів. Якщо цифрові елементи з'єднуються один з одним, то елементи АЦІ та ЦАІ не беруться до уваги. Якщо до входу або виходу підключені аналогові елементи, то програма PSpice автоматично вмикає потрібний інтерфейс, до якого автоматично під'єднується джерело живлення.

Моделювання вхідного ланцюга реального цифрового елемента за допомогою лінійного RC-ланцюга, як це зроблено в PSpice, не завжди забезпечує точність розрахунку. Тому користувач повинен розробити і мати декілька нелінійних моделей АЦІ у формі макромоделей. Кількість параметрів АЦІ в PSpice може досягати 19 [2].

ЦАІ вмикають на вході аналогових елементів. Аналогова напруга створюється за допомогою джерела опорної напруги та дільника на резисторах, опори яких змінюються програмно за експоненціальним законом, кількість параметрів ЦАІ може бути до 17 [2].

На наш погляд, використання двох різних теоретичних баз та різних ієрархічних рівнів призводить до складностей у розрахунках та надання результатів моделювання. В існуючих системах проектування ці проблеми досить штучно вирішуються за рахунок використання моделей АЦІ та ЦАІ інтерфейсів.

Постановка задачі та мета досліджень

В статті в якості єдиної теоретичної бази вибрана теорія передатних функцій, за допомогою якої проводиться опис цифрових, аналогових та аналого-цифрових елементів обробки інформації на логіко-функціональному рівні.

Передатні функції враховують більшу кількість параметрів елементної бази, ніж це є в теорії перемикаючих функцій. З другого боку, передатні функції менш детально відображають параметри аналогових пристроїв, ніж моделі на макрорівні в програмі PSpice. Окрім того, передатні функції дозволяють моделювати не тільки електронні пристрої, а й пристрої іншої природи, наприклад, пневматичні або оптичні.

Метою статті є розробка моделей найпростіших елементів, в яких вхідні та вихідні сигнали можуть мати цифрову або аналогову природу.

Моделі елементів з одним входом та одним виходом

Моделі ідеальних елементів з одним входом та виходом можуть визначатися найпростішими ступінчастими передатними функціями, які зображені на рис.1 і характеризують поведінку моделей у всьому діапазоні нормованих вхідних та вихідних сигналів. На логіко-функціональному рівні використовується поняття сигналу, без конкретизації певного носія [1].

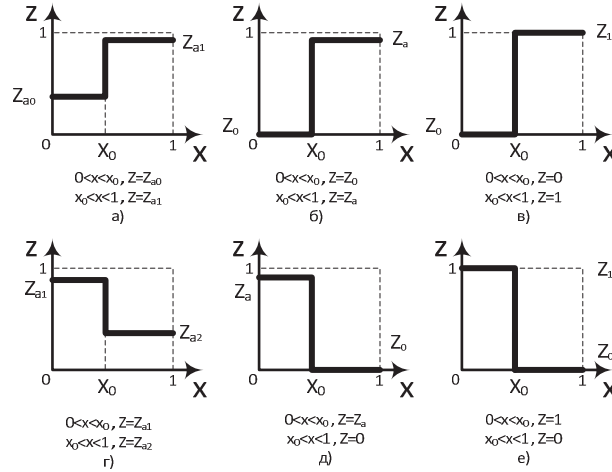


Рисунок 1 - Ступінчасті передатні функції елементів з одним входом та одним виходом

Передатні функції моделей «перетворювач рівня сигналу» з включенням більш високого рівня вихідного сигналу Z_{a1} значенням вхідного сигналу $X > X_0$ (рис.1а), та значенням $X < X_0$ (рис.1г), де X_0 – поріг спрацювання.

На рис. 1б та 1д зображені передатні функції моделей елементів, які генерують аналогове значення вихідного сигналу Z_a за значенням вхідного сигналу $X > X_0$, або значення Z_a значенням $X < X_0$.

На рис.1в та 1е наведені передатні функції цифрових елементів «повторювач сигналу» та відповідно «інвертор сигналу».

Такі передатні функції можуть мати тільки ідеальні елементи з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення в точці X_0 . Однак на відміну від одно входової моделі «примітиву», яка використовується в теорії перемикаючих функцій, модель того ж «примітиву» з передатною функцією має параметр X_0 – поріг спрацювання.

Більш складна модель одно входового елемента обробки інформації визначається кусково-лінійною передатною функцією, яка складається з трьох відрізків, обмежених чотирма вузлами 1, 2, 3, 4, як це показано на рис.2а та рис.2д.

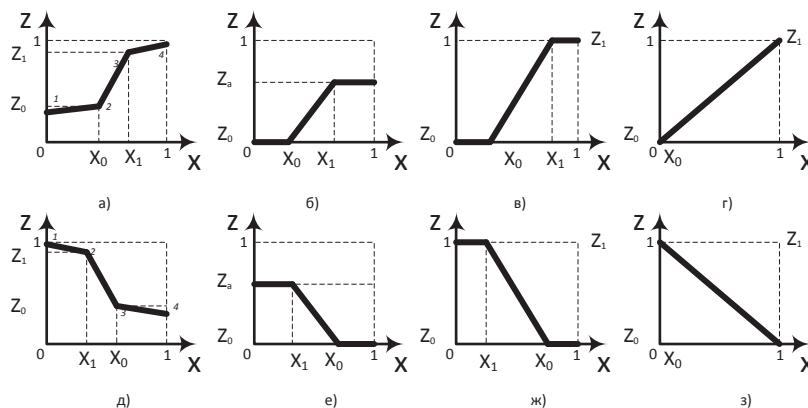


Рисунок 2 - Кусково-лінійні передатні функції елементів з одним входом та одним виходом

Кусково-лінійна функція визначається системою рівнянь

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

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. Для функції рис.2а знаходяться в діапазонах $0 < (K_1, K_3) < 1$; $K_2 > 1$. Коефіцієнти перетворення функції рис.2 д 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.

В залежності від взаємного положення вузлів 1, 2, 3, 4 передатна характеристика може бути такою, якою вона зображена на рис.2б, в, г, е, ж, з.

Якщо у передатній функції рис.2а $Z_1 = Z_2 = 0$, а $Z_3 = Z_4 = Z_a$, або $Z_1 = Z_2 = Z_a$; $Z_3 = Z_4 = 0$, то вона має вигляд функцій на рис.2б та рис.2е відповідно. Така функція може бути у елемента, що генерує значення Z_a аналогової величини за умов $X > X_1$ або $X < X_1$ відповідно. На ділянці X_0, X_1 вихідне значення Z_a не визначено.

На рис.2в та рис.2ж передатні функції моделей відповідають аналоговим підсилювачам типу rail-to-rail з прямим та інверсним входами, якщо вхідний сигнал змінюється на ділянці X_0, X_1 , або цифровим елементам «повторювач» або «інвертор», для яких на ділянці X_0, X_1 вихідний сигнал не визначений.

На рис.2г у передатній функції $X_1 = X_2 = Z_1 = Z_2 = 0$; $X_1 = X_2 = Z_1 = Z_2 = 1$; коефіцієнт перетворення $K_2 = 1$, що характерно для моделі операційного підсилювача-повторювача.

Передатна функція рис.2з має $X_1 = X_2 = Z_1 = Z_2 = 1$; $X_1 = X_2 = Z_1 = Z_2 = 0$; коефіцієнт перетворення $K_2 = -1$, і відповідає операційному підсилювачу-інвертору.

На функціонально-логічному рівні за допомогою системи Мікросар 9.0 були отримані передатні характеристики цифрових інвертуючих елементів мікросхеми ТТЛ типу 74ALS00А та мікросхеми КМОН типу 74AC00, які подібні до передатної характеристики рис.2ж.

Для мікросхеми 74ALS00А $Z_1 = 3,32$ В; $Z_0 = 0,28$ В; $X_1 = 1,4$ В; $X_0 = 1,401$ В. Розраховані коефіцієнти перетворення $K_1 = K_3 = 0$; $K_2 = (Z_1 - Z_0)/(X_1 - X_0) = 3,04$ В/ $-0,001$ В = -3040 .

При моделюванні на макрорівні в системі OrCAD 16.0 елемента ТТЛ, подібного до 74ALS00А, одержані такі дані: $Z_1 = 5,0$ В; $Z_0 = 0,0$ В; $X_1 = 1,3$ В; $X_0 = 1,7$ В. Розраховані коефіцієнти перетворення $K_1 = K_3 = 0$; $K_2 = (Z_1 - Z_0)/(X_1 - X_0) = 5,0$ В/ $-0,4$ В = $-12,5$.

Для мікросхеми КМОН типу 74AC00 моделювання на функціонально-логічному рівні дало наступні результати: $Z_1 = 4,99$ В; $Z_0 = 1,0$ мВ; $X_1 = 2,53$ В; $X_0 = 2,536$ В. Розраховані коефіцієнти перетворення $K_1 = K_3 = 0$; $K_2 = (Z_1 - Z_0)/(X_1 - X_0) = 4,99$ В/ $-0,006$ В = -832 .

Таким чином, передатні характеристики, одержані на функціонально-логічному рівні та на макрорівні за допомогою систем автоматизованого проектування, суттєво відрізняються між собою, особливо значеннями коефіцієнтів перетворення.

Моделі аналогових, аналого-цифрових та цифро-аналогових елементів з двома входами та одним виходом

Кожен елемент обробки інформації з двома входами та одним виходом складається з наступних функціональних блоків нижчого рівня (рис.3):

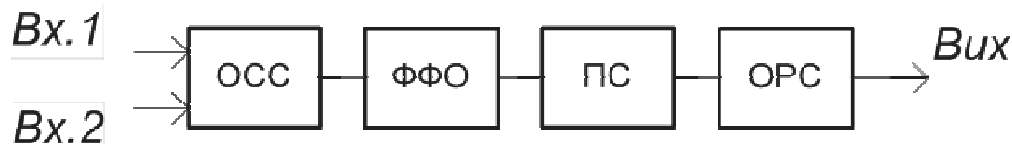


Рисунок 3 - Функціональний склад елемента обробки інформації

- обмежувача споживання енергії вхідного сигналу (ОСС);
- формувача функції обробки сигналу (ФФО);
- підсилювача сигналу (ПС);
- обмежувача рівнів вихідного сигналу (ОРС).

В залежності від форми вхідних, вихідних сигналів та особливостей формувача функції обробки сигналу всі елементи можливо розподілити на 6 типів (табл.1).

Таблиця 1 - Типи елементів обробки інформації в залежності від форми вхідних та вихідного сигналів

NN пп	Вх.1	Вх.2	Вихід
1	А	А	А
2	Ц	А	А
3	Ц	Ц	А
4	Ц	А	Ц
5	А	А	Ц
6	Ц	Ц	Ц

Назви типу елементів за номером, відповідно до нумерації табл.1, наведено нижче.

1. Аналоговий елемент.
2. Аналоговий елемент з цифровим керуванням.
3. Цифро-аналоговий елемент.
4. Цифровий елемент з аналоговим керуванням.
5. Аналого-цифровий елемент.
6. Цифровий елемент.

Ці елементи мають два входи та один вихід, тому цілком логічно проаналізувати передатні характеристики їх моделей у тривимірному просторі.

Типовим представником аналогового елемента є операційний підсилювач, який може бути включений за різними схемами. На рис.4а наведено передатну характеристику підсумовувача двох аналогових сигналів X та Y з інверсією.

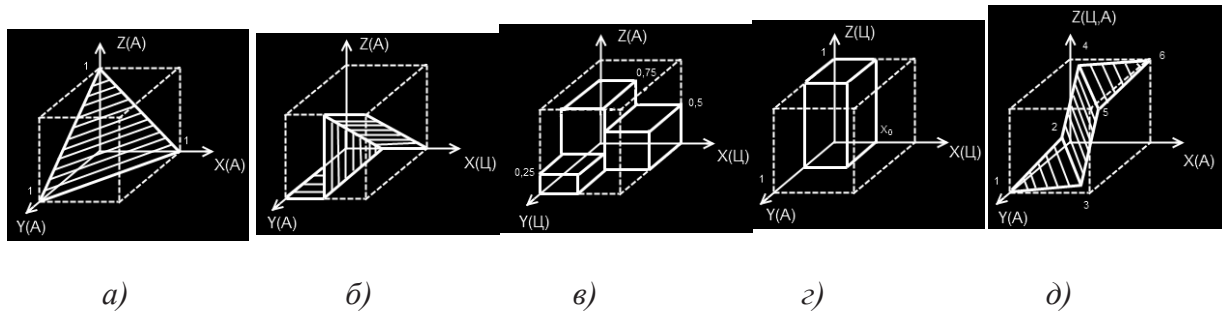


Рисунок 4 - Кусково-площинні передатні функції двох змінних в залежності від форми вхідних та вихідного сигналів

Для моделі аналогового елемента з цифровим керуванням, яким є аналоговий ключ, з відкриванням його одиничним цифровим керуючим сигналом, передатна характеристика зображена на рис.4б.

Передатна характеристика моделі цифро-аналогового елемента, який при одиничному значенні вхідного цифрового сигналу X генерує значення вихідного аналогового сигналу $Z_{aX} = 0,25$, а при одиничному значенні вхідного цифрового сигналу Y генерує значення $Z_{aY} = 0,5$ та підсумовує ці два вихідні сигнали $Z_a = Z_{aX} + Z_{aY}$, зображена на рис. 4в.

Модель цифрового елемента з аналоговим керуванням має передатну характеристику, яка зображена на рис.4г. Для неї цифровий вихідний сигнал $Z = 0$, якщо вхідний аналоговий сигнал має значення $Y > X_0$, та $Z = 1$ за $Y < X_0$.

Якщо входи X та Y аналогові, а вихід Z цифровий, то передатна характеристика такої моделі зображена на рис.4д і цим елементом є компаратор аналогових сигналів. Вихідне цифрове значення його не визначено, якщо вхідні сигнали знаходяться у площині 2, 3, 4, 5. Для вхідних сигналів у цьому діапазоні модель виконує функцію операційного підсилювача без зворотного зв'язку, тобто є моделлю аналогового елемента.

Моделі цифрових елементів з двома входами та одним виходом

На рис.5 наведені ступінчасті передатні функції моделей 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 КМОП інвертора, результати моделювання якого наведені у даній статті, дорівнює 0,5.

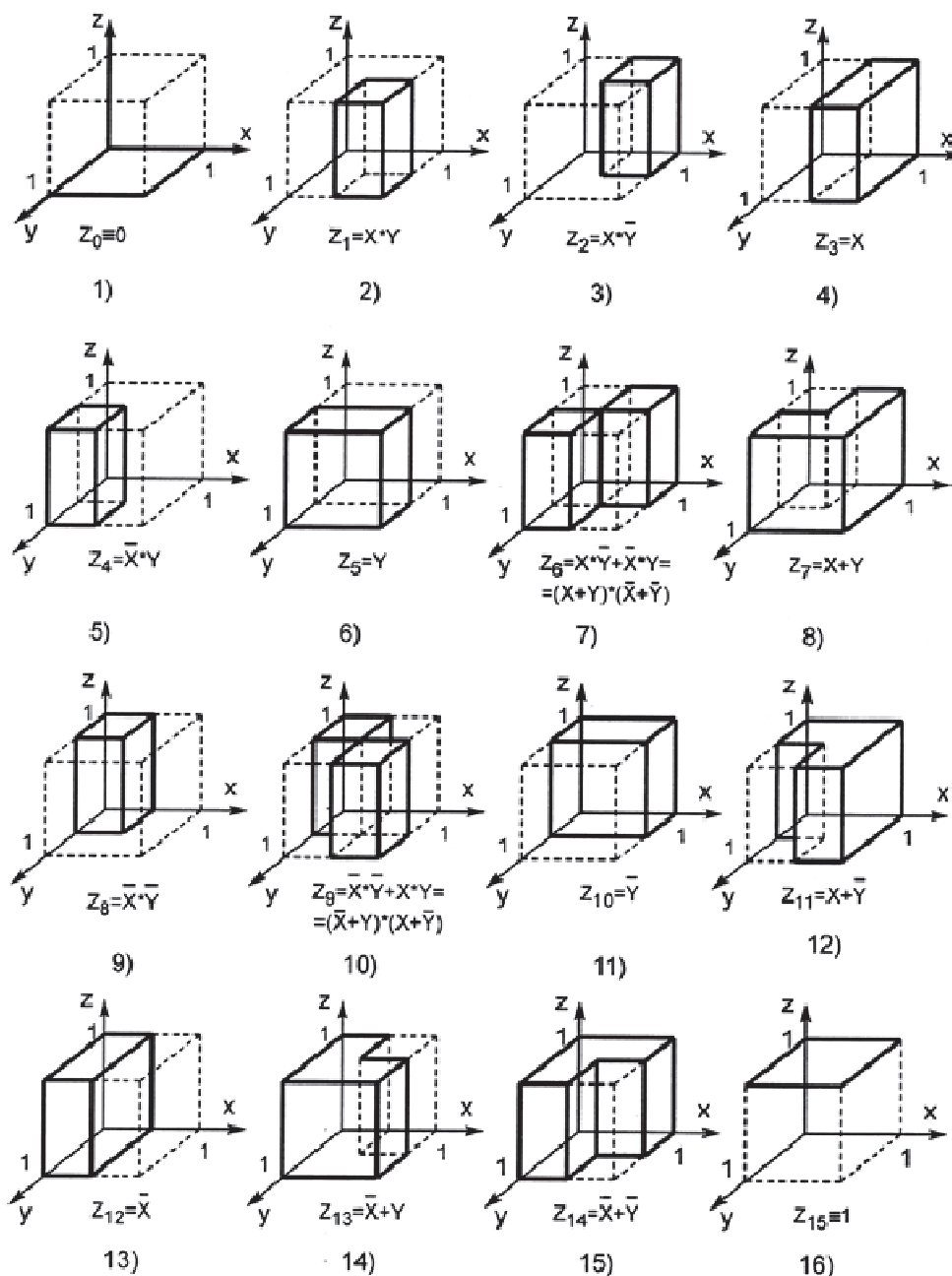


Рисунок 5 - Передатні функції цифрових елементів з двома входами

Під графічним зображенням кожної передавальної функції розміщено її формульне зображення через перемикаючі функції кон'юнкцію І, диз'юнкцію АБО, інверсію НІ, причому знак "*" відповідає кон'юнкції, а знак "+" - диз'юнкції.

Класифікація функцій за геометричними ознаками наведена на рис.6.

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

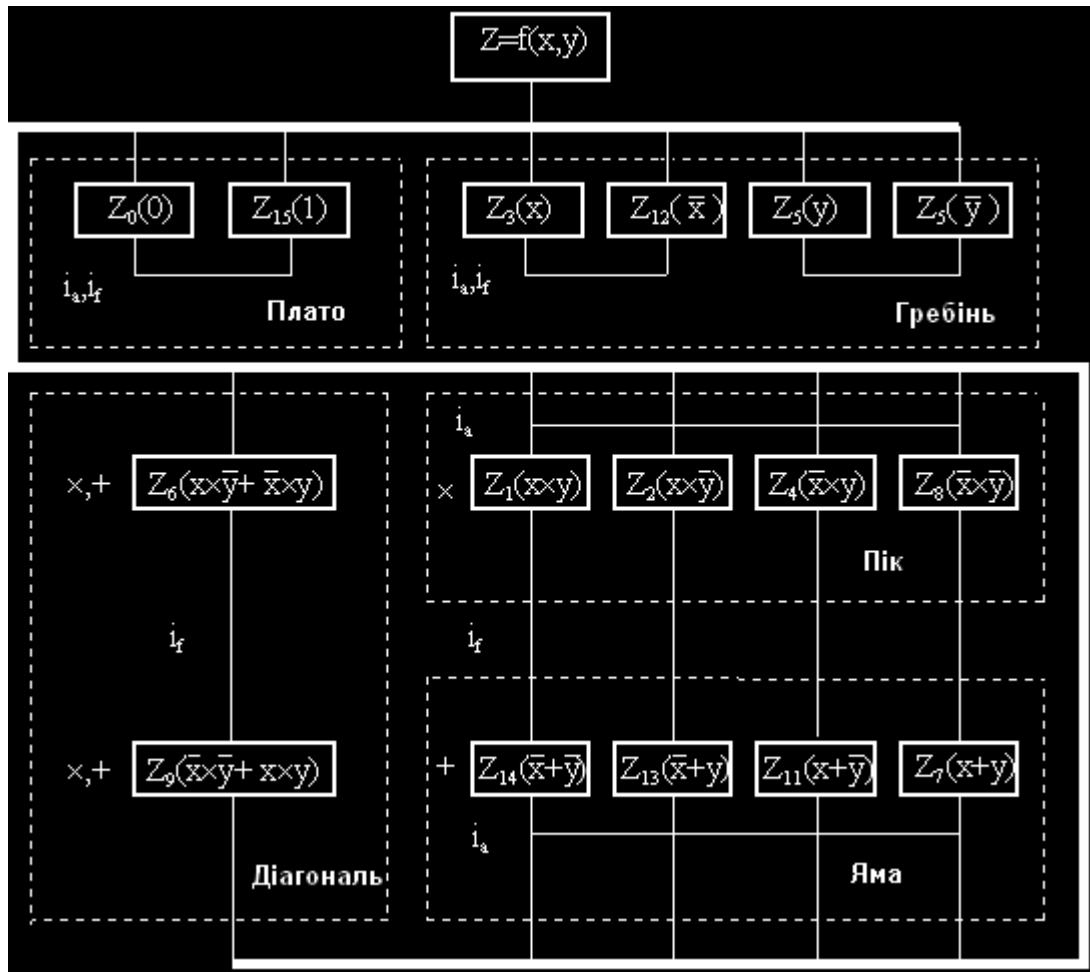


Рисунок 6 - Класифікація передавальних функцій двох змінних за геометричними ознаками.

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” відомі як кон’юнкція двох змінних або їх інверсій та мають назву конститuentи 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 конститuentи 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, $NI(Z_1)=Z_{14}, NI(Z_2)=Z_{13}, NI(Z_4)=Z_{11}, NI(Z_8)=Z_7$.

Функції Z_6 та Z_9 також є інверсією одна одної.

Якщо комбінувати об’ємні моделі функцій з рис.5, можливо з геометричних міркувань одержати відомі формули для системи функцій: поглинання, склеювання, формули де Моргана.

Питання про функціонально повну систему функцій, яка дозволяє сконструювати через них довільну функцію з цього класу або питання про ортогональний базис, вирішено в літературі [4, 5]. Найбільш прийнятною з практичних міркувань для синтезу пристроїв ЕОМ є система функцій, яка складається з кон’юнкції, диз’юнкції та інверсії [5].

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 (інверсія).

З рис.6 витікає, що диз'юнктивні та кон'юнктивні функції пов'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 проводити розрахунок та моделювання аналого-цифрових пристроїв на основі єдиної теоретичної бази, а саме теорії передавальних функцій.

2. Розроблена класифікаційна таблиця моделей елементів обробки інформації з двома входами, в якій, в залежності від форми подання інформації на входах та виході, всі елементи розподіляються на 6 типів.

3. Наведені тривимірні моделі передатних функцій всіх 6 типів моделей елементів обробки інформації.

4. Виконана класифікація моделей цифрових елементів з двома входами за геометричними ознаками передатних функцій.

5. За допомогою систем моделювання Місросар 9.0 та OrCAD 16.0 одержано передатні функції моделей цифрових елементів типу «інвертор» на функціонально-логічному рівні та макрорівні. Показано, що параметри моделей різних рівнів одного й того ж самого елемента суттєво відрізняються.

Список використаної літератури

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования.- М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002. - 336 с.
2. Гаврилов Л. Системы автоматизированного проектирования (САПР) аналоговых и аналого-цифровых устройств. -М.: Электронные компоненты, 2000.- №3.- 2000.- С.61-66.
3. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2.- М.: СОЛОН-Р, 2003.- 528 с.
4. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. - М.: ФМгиз, 1962. -476 с.
5. Вавилов Е.Н., Портной Г.П. Синтез схем электронных цифровых машин. -М.: Сов.радио, 1963. - 440 с.

Відомості про авторів

Багацький Валентин Олексійович – д.т.н., провідний науковий співробітник Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України, м. Київ, пр. Глушкова, 40, (044) 526-34-51.

Багацький Олексій Валентинович – молодший науковий співробітник Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України, м. Київ, пр. Глушкова, 40, (044) 526-34-51.