INFORMATICA 4/1982

MATEMATIČNI MODELI MEHURČNIH PREKLOPNIH VEZIJ 1. DEL

P. KOLBEZEN,
B. MIHOVILOVIĆ,
J. ŠILC

UDK: 681.327.6

INSTITUT „JOŽEF STEFAN", LJUBLJANA

Problemi načrtovanja sistemov v najsodobnejših tehnologijah se vse bolj nanašajo na strukturo in modularnost sistemov. Članek preučuje uporabo matematičnih modelov, na katerih je mogoče obravnavati probleme logičnega načrtovanja v tehnologiji magnetnih mehurčkov. V drugem delu članka so definirani novi problemi minimizacije in razredi funkcij v zvezi z ohranjevanjem mehurčkov in lastnostmi funkcijskih izhodov.

MATHEMATICAL MODELS OF MAGNETIC BUBBLE LOGIC. In current technologics problems of structure and modularity in design have become increasingly important. In this paper it is considered the use of models to treat logic design problems in the technology of magnetic bubbles. In the second part of the paper new minimization problems and associated classes of functions are defined with respect to bubble preservation and function fanout properties.

1. UVOD

Večina problemov načrtovanja digitalnih sistemov se je v preteklosti nanašala na minimizacijo njihovih komponent. Načrtovanje v dandanašnjih tehnologijah pa vse bolj in bolj zadeva probleme, ki se nanašajo na strukturo in modularnost sistemov. Tovrstni problemi bodo brez dvoma še bolj prisotni v prihodnjih tehnologijah. Pri uvajanju nove tehnologije je za poenoten pristop k reševanju problematike načrtovanja potrebno najpreje izdelati model, ki natančno odraža fizikalne značilnosti tehnologije, in na katerem je mogoče probleme tudi matematično obravnavati. Mnogo problemov se pogosto rešuje na takšnem matematičnem modelu, ki je podoben modelom prejšnjih tehnologij.

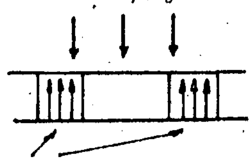
V tem delu bomo proučevali modele, na katerih je mogoče obravnavati probleme logičnega načrtovanja v eni od tehnologij, ki kaže potencialno uporabnost v bodočih digitalnih sistemih. To je tehnologija magnetnih mehurčkov. Videli bomo, da je mogoče ne le modelirati logiko magnetnih mehurčkov, ampak jo tudi obravnavati z vidika logičnega načrtovanja. Če hkrati upoštevamo tudi časovne parametre, so problemi podobni problemom načrtovanja asinhronih sistemov, čeprav jim niso povsem enaki. Definirali bomo nove probleme minimizacije in razrede funkcijskih izhodov.

Videti je, da bodo magnetni mahurčni pomnilniki širše uporabljivi v tistih bodočih digitalnih sistemih, v katerih bodo potrebni večji pomnilniki ali majhna poraba. V takšnih napravah je zaželjeno, da je sicer kompleksni vmesnik med mehurčnim pomnilnikom in ostalim delom naprave, ki je grajen v drugačni tehnologiji, čim manjši in preprostejši. To pa je tudi eden od zanimivejših problemov načrtovanja logike, ki uporablja magnetne mehurčke.

Magnetne mahurčke lahko uporabljamo tako za pomnenje informacij, kot tudi za izvajanje logičnih funkcij. Čeprav je hitrost delovanja mehurčnih sistemov za večkratni velikostni razred nižja od hitrosti sodobne polprevodniške tehnologije in s tem tudi njihova uporaba nekoliko omejena, so mehurčni sistemi zanimivi tam, kjer je pomembna zlasti robustnost, majhna poraba energije, zanesljivost in čim manjše vzdrževanje.

2. FIZIKALNE OSNOVE

Nekatere vrste magnetnih materialov, tako kot enojni kristalni magnetni oksidi in ortoferiti, imajo lastnost, da se lažje magnetizirajo v eni smeri kot v drugi. V tanki ploščici takšnega materiala se pri ustreznih pogojih z magnetnim poljem, ki je pravokotno usmerjeno na ploščico v smeri lažje magnetizacije, ustvarijo stabilne magnetne domene. Te domene imajo smer magnetizacije, ki je nasprotna smeri zunanjega magnetnega polja. Pod vplivom polja primerne jakosti v smeri lažje magnetizacije postanejo magnetne domene celindrične oblike. Takšne domene imenujemo magnetne mehurčke. Slika 1 kaže presek nad ortoferitno ploščico, zunanjim poljem in polarizacijo mahurčkov.



Slika 1. Presek ortoferitne ploščice

Premer mehurčkov je nekaj do več sto mikronov. Razlike so odvisne od izbire magnetnega materiala.

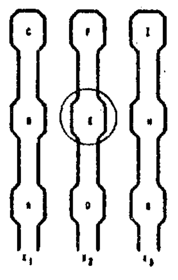
Velikost in obliko magnetnih domen določa jakost zunanjega polja. Če polje upada, premer mehurčka narašča in končno postane domena necilindrična. Nasprotno pa z naraščanjem zunanjega polja upada premer mehurčka in pri premočnem polju le-ta izgine.

Namestitev mehurčkov v ploščici je lahko omejena na končno množico možnih pozicij. Prisotnost ali odsotnost mehurčka na določeni lokaciji moremo interpretirati kot prisotnost logične vrednosti "1" ali "0" spremenljivke, ki je določena z lokacijo. Mehurčki lahko potujejo, podobno kot delci, od ene lokacije do druge. Poleg tega odbijajo drug drugega, kar je mogoče izkoriščati za izvrševanje logičnih funkcij. S tem pa se odpirajo magnetnim mehurčkom dodatne možnosti v aplikacijah procesiranja podatkov.

3. PROPAGACIJE MEHURČKOV

Poznamo več metod, ki jih uporabljamo za premike mehurčkov znotraj ploščic: na sliki 2 vidimo eno od možnih metod, ki je osnovana na prevodni tokovni zanki. Ta ustvarja lokalna magnetna polja. Iz slike vidimo, da so zanke zaključene le na enem koncu. Tako je olajšana njihova izdelava, osnovana na tehniki tankoplastnega filma.

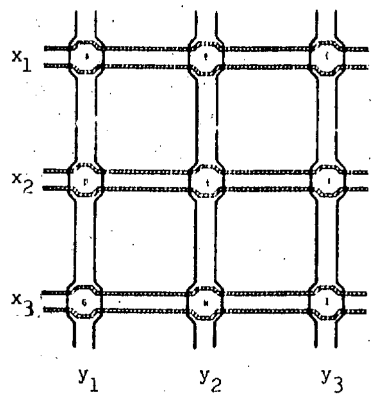
Mehurčki se bodo premaknili iz ene zanke v drugo, sosednjo zanko pod vplivom tokovnega impulza v sosednji zanki v smeri, ki v prvi zmanjša vpliv zunanjega polja.



Slika 2. Propagacija s prevodno zanko

Na sliki 2 se bo mehurček pod tokovnim impulzom skozi zanko X_3 premaknil iz lokacije E v H. Podobno se zaradi tokovnega impulza v zanki X_1 premakne mehurček iz E v B. Tok v zanki pritegne mehurček iz sosednjih zank. Da to preprečimo v eni od sosednjih zank, moramo s tokovnim impulzom skozi izbrano zanko ustvariti primerno "zaviralno polje", ki prepreči, da jo mehurček zapusti.

Z drugo množico zank, ki je pravokotna na prvo množico (slika 3), moremo mehurček premakniti iz poljubne pozicije v katerokoli drugo od štirih sosednjih pozicij. S primernim zaporedjem nadaljnjih impulzov pa v katerokoli drugo pozicijo. Mehurček iz pozicije A na sliki 3 premaknemo v pozicije H z eno od naslednjih impulznih sekvenc: Y_2, Y_3, X_2 ali Y_2, X_2, Y_3. To metodo imenujemo metodo kontroliranega dvodimenzionalnega premikanja magnetnih mehurčkov.

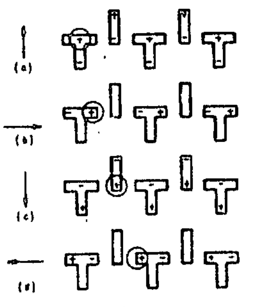


Slika 3. Propagacija s prevodno zanko v dveh dimenzijah

Pri drugi metodi propagacije mehurčkov je uporabljena permalojna prevleka in v njeni ravnini rotirajoče magnetno polje /1/. Permalojni vzorci na ploščici vsebujejo mehurčke. Na sliki 4 vidimo vzorec, ki se pogosto uporablja. Sestavljajo ga T-ji in palice (I-ji). Propagacijo mehurčkov takšnega tipa imenujemo T-paličasto ali TI-propagacijo.

Pri TI-propagaciji mora obstajati osnovno magnetno polje, ki drži mehurčke v stabilnem stanju. Drugo polje, ki se vrti v ravnini materiala, pravokotno na osnovno polje, pa rabi za gibanje mehurčkov. Zaradi visoke permeabilnosti permalojnega nanosa ustvarja magnetno ravninsko polje magnetne pole v permalojni prevleki. Pri določeni smeri ravninskega magnetnega polja dosežejo mehurčki energetsko šibko pozicijo mirovanja. Rotirajoče magnetno polje v ravnini pa tedaj povzroči premik mehurčkov. Te smatramo za nekakšne "magnetne naboje", ki poskušajo doseči pozitivne pole permalojnih magnetov. Slike 4a do 4d kažejo gibanje mehurčkov med enim obratom magnetnega polja. V nasprotno smer rotirajoče polje pa povzroči pomik mehurčka v smeri, ki je nasprotna prejšnji smeri. Propagacija mehurčka, ki izkorišča permalojne prevleke, kot na primer zgoraj obravnavana metoda TI-propagacije, se zaradi preproste kontrole najpogosteje uporablja.

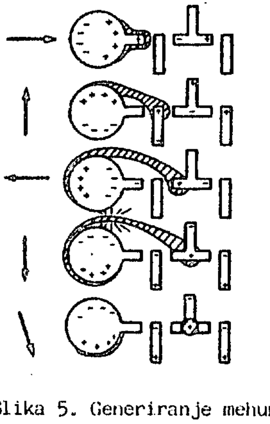
V primeru propagacije, ki izkorišča prevodna vezja, si morajo tokovni impulzi zank slediti v točni sekvenci. To omogoča gibanje mehurčka od ene lokacije do druge. Zahtevana sekvenca pa ni potrebna v primeru TI-propagacije. V primeru TI-organizacije na sliki 4 lahko uporabimo pomikalni register. Mehurček se bo pomaknil od enega T-vzorca do naslednjega v času enega cikla rotirajočega magnetnega polja.



Slika 4. TI-propagacija

3.2. Generiranje, destruiranje in detektiranje mehurčkov

Permalojna vezja se lahko uporabljajo tudi za generiranje in destruiranje mehurčkov /1,2/. Generacija mehurčka nastane s cepitvijo enega mehurčka v dva, kar nazorno kaže slika 5. Velik permalojni disk na začetku TI-propagacijske poti ima mehurček, ki predstavlja vir novega mehurčka. Pod vplivom rotirajočega magnetnega polja se ta mehurček, ki je priklenjen na TI-vzorec, raztegne in končno razdeli v dva dela. Nato zavzameta oba mehurčka premer, ki je določen z jakostjo osnovnega magnetnega polja. Prvi mehurček ostane na permalojnem disku, drugi pa se za tem širi vzdolž TI-propagacijske poti. Destruiranje mehurčka povzroči obraten proces, ki se konča z združitvijo "ponornega" mehurčka z velikim diskom na koncu TI-propagacijske poti.



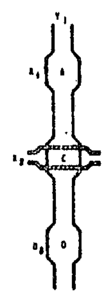
Slika 5. Generiranje mehurčka

Pri povezovanju magnetnega mehurčnega pomnilnika ali logike s konvencionalnimi vezji moramo detektirati prisotnost mehurčkov na določenih lokacijah in generirati ustrezne električne signale. V ta namen se uporablja več metod. Znane so: magnetooptična metoda detekcije, detekcija, ki izkorišča Hallov efekt, in metoda odtipavanja z magnetno rezistenčnimi napravami /1/.

3.3. Logične operacije

Z magnetnimi mehurčki je mogoče realizirati tudi osnovne logične funkcije. Obstoječe realizacije takšnih funkcij so osnovane na magnetostatičnem odboju med mehurčki, ki se nahajajo na sosednjih lokacijah. Mehurčke je mogoče prenesti na željene lokacije z rabo ene od zgoraj obravnavanih propagacijskih shem. V obeh obravnavanih shemah je pomik mehurčka pri vsakokratnem tokovnem impulzu ali rotaciji polja konstanten. Pri izvajanju logičnih operacij morajo biti mehurčki krmiljeni na poseben sinhroni način.

Slika 6 kaže metodo realizacije nekaterih preprostih logičnih funkcij dveh spremenljivk s prevodnimi zankami. Najpreje se mehurčka, ki predstavljata spremenljivki x_1 in x_2, razširita na lokaciji A in B. Mehurček bo prisoten na poziciji A, če in samo če bo $x_1 = 1$, in na poziciji B, če in samo če bo $x_3 = 1$. Predpostavljamo, da v začetku mehurček ni prisoten na poziciji C. Če steče skozi X_2 tokovni impulz, se bosta mehurčka odbijala drug od drugega. Torej se bo v C pojavil mehurček le tedaj, če se mehurček v času tokovnega impulza skozi X_2 nahaja v eni izmed pozicij A ali B. Ker predstavlja pozicija C logično funkcijo vsote po modulu 2 $(x_1 \oplus x_3)$. Na pozicijah A in B se mehurčka obdržita, če in samo če se v začetku hkrati nahajata na obeh pozicijah. Zato pozicija A in hkrati tudi B predstavljata funkcijo logičnega produkta $(x_1 . x_3)$.

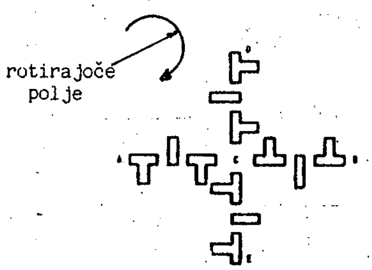


Slika 6. Realizacija logičnih funkcij pri tokovnih zankah

Z različno geometrijo propagacijskih permalojnih vzorcev ali z različnimi materiali propagacijskih vzorcev je mogoče zagotoviti, da se mehurček postavi na pozicijo C pod vplivom tokovnega impulza v X_2 tudi, če se mehurčka hkrati nahajata na obeh pozicijah A in B. V tem primeru predstavlja pozicija C funkcijo $x_1 + x_3$.

Možna pa je tudi sekvenca, ki omogoča realizacijo funkcije $x_1 . x_3$ na poziciji C, na naslednji način: s tokovnim impulzom skozi X_2, se na poziciji C pojavi mehurček, če je le-ta prisoten na poziciji A ali B ali na obeh pozicijah hkrati. Če se v naslednjem koraku pojavi tokovni impulz skozi X_2 ustrezne jakosti in nasprotne smeri, se mehurček v C (če obstaja) uniči. Ponovni impuls v X_2 pa lahko pomakne mehurček, ki je ostal na poziciji A ali na poziciji B, v pozicijo C. Po treh tokovnih impulzih se mehurček nahaja na obeh pozicijah A in B.

Logične funkcije je možno realizirati tudi s TI-propagacijo. Takšno realizacijo prikazuje slika 7. Z rotirajočim poljem v ravnini, se mehurčka v A (ki predstavlja spremenljivko x_1) in/ali v B (ki predstavlja spremenljivko x_2) pomikata v C, od te pozicije pa dalje proti D ali E. S primerno namestitvijo vzorcev T in I na križišču dveh poti je mogoče doseči, da se mehurček pomika po eni sami poti, po tako imenovani "lažji poti", če le ni v neposredni bližini drugega mehurčka.

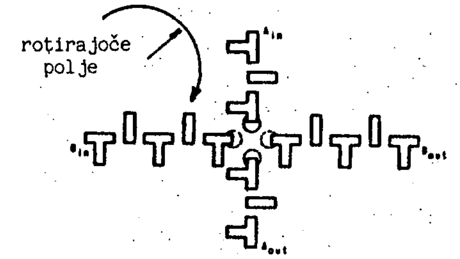


Slika 7. Realizacija logičnih funkcij pri TI-propagaciji

Odbojni vpliv sosednjih mehurčkov povzroči, da začne mehurček potovati po drugi poti, tako imenovani "težji poti". Na sliki 7 naj bo pot do pozicije D "lažja pot", medtem ko naj bo pot iz obeh pozicij A in B "težja pot".

Če se mehurček najpreje nahaja ali na poziciji A ali na poziciji B, bo proti D potoval po lažji poti. Če pa se mehurček hkrati nahaja na obeh pozicijah A in B, bosta oba mehurčka dosegla C istočasno. Eden od mehurčkov bo odbit v C potoval proti E po "težji poti", medtem ko bo drugi mehurček potoval proti D po "lažji poti". Na ta način predstavlja lokacija D funkcijo $x_1 + x_2$, lokacija E pa funkcijo $x_1 . x_2$. Na podoben način je mogoče realizirati tudi druge osnovne logične funkcije s primerno geometrično ureditvijo permalojnih vzorcev. Z opisanimi elementi, ki so standardnih velikosti in struktur, je možno graditi polja elementov poljubnih velikosti. Takšna polja omogočajo realizacijo različnih logičnih funkcij. Pri tem je vsak osnovni element v interakciji s sosednjimi elementi.

Slika 8 kaže mehurčno realizacijo dveh vodnikov, ki križata drug drugega. Vezje mora biti inicializirano s kroženjem mehurčka na sečišču obeh poti, kar je tudi razvidno iz slike 8. Mehurček, ki bo pripotoval od vhoda A_{in}, bo odbil krožeči mehurček navzdol po poti k izhodu A_{out}, sam pa bo začel krožiti na sečišču obeh poti. Enako se dogaja, če mehurček pripotuje od vhoda B_{in}. Kateri mehurček bo ostal v sečišču, če mehurčka potujeta hkrati po obeh poteh, je odvisno od relativnih časovnih situacij mehurčkov na poteh A in B, zanesljivo pa oba mehurčka pripotujeta do izhodov A_{out} in B_{out}.



Slika 8. TI-realizacija prekrižanih poti

4. MATEMATIČNI MODEL MEHURČNIH INTERAKCIJ

Lastnosti, ki se nanašajo na logiko magnetnih mehurčkov, bomo študirali na matematičnem modelu mehurčnih interakcij. Model bomo zgradili na osnovi nekaterih značilnih fizikalnih lastnostih mehurčkov, ki smo jih obravnavali v gornjih razdelkih.

Predpostavljamo, da ja V množica vrhov. Ti naj predstavljajo množico vseh možnih položajev mehurčkov. Predpostavljamo, da je lahko katerikoli par vrhov iz V v medsebojni interakciji. V praksi sta lahko v interakciji samo dva sosednja mehurčka. Mi pa v tem poglavju predpostavljamo, da takšna omejitev ne obstaja. Na ta način se lažje dokopljemo do nekaterih predhodnih rezultatov, ki so neodvisni od omenjene omejitve. Najprej obravnavamo najpreprostejšo operacijo, ki omogoča prenos mehurčka od vrha A k vrhu B. Pri tem naj se gibanje posameznih mehurčkov izvaja po propagacijski metodi, ki je osnovana na prevodnih zankah. Metodo smo že predhodno obravnavali v poglavju 2.

Mehurček se pomakne od A k B pod vplivom primernega magnetnega polja v B in zaviralnega polja na vseh sosednjih lokacijah, razen na lokaciji A. Mehurček se giblje od A k B, če in samo če je prisoten v A, v B pa ne. Označimo takšno interakcijo med A in B z e = (A,B). Imenujemo jo "mehurčni prenos" (bubble transfer /3/). Kot smo že zgoraj omenili, predpostavljamo, da sta v našem matematičnem modelu A in B lahko poljubna vrhova. V praksi pa se izkaže, da sta takšna vrhova lahko le sosednja vrhova. Ekvivalentno temu lahko tudi predpostavljamo, da so v našem matematičnem modelu vsi vrhovi iz V sosednji vrhovi poljubno izbranemu vrhu iz V.

Naj bo $X \subseteq V$ množica vrhov, ki v začetku vsebujejo mehurček, in X^e množica vrhov, ki bodo vsebovali mehurček po mehurčnem prenosu $e = (A,B)$. Potem

$$X^e = (X - \{A\}) \cup \{B\} \quad \text{če } A \in X \text{ in } B \notin X$$

in drugače

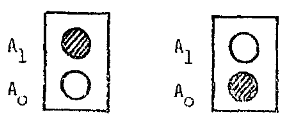
$$X^e = X .$$

Vsako takšno interakcijo bomo smatrali kot "instrukcijo" in sekvenco takšnih instrukcij kot "program" /3/.

Naj bosta a in b binarni spremenljivki, ki predstavljata začetna pogoja na lokacijah A in B (to je a = 1, če je na lokaciji A mehurček prisoten, in A = 0, če mehurček ni prisoten). Nadalje naj bosta a' in b' binarni spremenljivki, ki predstavljata pogoja na teh lokacijah po interakciji e = (A,B), in sicer

$$a' = a.b$$
$$b' = a + b$$

Tak mehurčni prenos uporabljamo za izvajanje logičnih funkcij "IN" in "ALI". Da dobimo operacijo komplementiranja, moramo pri odsotnosti mehurčka mehurček generirati in obratno: pri prisotnosti mehurčka mehurček odstraniti; v obeh primerih z enako sekvenco instrukcij prenosa. To pa ne moremo izvesti samo z mehurčnim prenosom. Spremenljivko moramo določiti z dvema mehurčnima lokacijama, namesto ene same. Predstavitev takšne spremenljivke kaže slika 9. Logična vrednost spremenljivke a je določena s prisotnostjo oz. odsotnostjo mehurčka na lokacijah A_1 in A_2. Prisotnost mehurčka na lokaciji A_1 in ne na lokaciji A_2, predstavlja a = 1, ter prisotnost mehurčka na lokaciji A_0, in ne ne lokaciji A_1, predstavlja a = 0. Na ta način sta obe logični vrednosti določeni s prisotnostjo mehurčkov. Pri takšni določitvi spremenljivke je namreč nepotrebno, da pri odsotnosti mehurčka v poziciji A_1 zagotovimo prisotnost mehurčka v A_0 in obratno. Vidimo, da je za n dvojiških spremenljivk potrebnih 2n lokacij.



Slika 9. Predstavitev spremenljivke z dvema lokacijama

Naj bo 2^n možnih kombinacij n spremenljivk zakodiranih v kodu "k od m". To je kod, ki zagotavlja natančno k izhodov m spremenljivk v "1" pri poljubni vhodni kombinaciji. Lahko bi dokazali:

1., da je pri takšnem načinu kodiranja mogoče realizirati poljubno logično funkcijo brez funkcije negacije, in

2., da je predstavitev 2^n vhodnih kombinacij potrebnih le m lokacij, če sta m in k takšna da velja

$$\binom{m}{k} \geq 2^n$$

Predpostavimo, da je vsaka spremenljivka določena z dvema lokacijama in da na lokaciji B ni mehurčka. Potem moremo spremenljivko a komplementirati s programom

$P = e_1 e_2 e_3$, kjer je

$e_1 = (A_1, B)$; $e_2 = (A_0, A_1)$ in $e_3 = (B, A_0)$

Po izvršenem programu je vsebina na obeh lokacijah dana z enačbama

$$a_1^P = a_0 \quad \text{in} \quad a_0^P = a_1$$

kjer predstavlja a_i vsebino na lokaciji A_i, $i = 0,1$.

Ker smo dokazali, da moremo logične operacije IN, ALI in NE realizirati le z mehurčnimi prenosi, smemo zaključiti, da moremo z njimi izračunati tudi katerokoli logično funkcijo. Klasične metode realizacije pa upoštevajo tudi izhodni indeks. Do tu nismo pokazali, da lahko ta indeks upoštevamo tudi v našem matematičnem modelu mehurčnih interakcij. Vedeti moramo namreč, da bi v nasprotnem primeru samo z mehurčnimi prenosi ne mogli realizirati katerokoli logično funkcijo. V dokaz temu potrebujemo nekaj predhodnih ugotovitev.

Naj bosta $X \subseteq V$ in $Y \subseteq V$ množici lokacij, ki vsebujejo mehurčke. Število lokacij, ki so skupne množicama X in Y, to je $|X \cap Y|$, bomo imenovali prekrivanje množic X in Y.

Lahko dokažemo naslednje: Če $e = (A,B)$ in sta $X, Y \subseteq V$, množici, ki v začetku vsebujeta mehurčke, velja $|X^e \cap Y^e| \geq |X \cap Y|$. Dokaz najdemo v /5/.

Nadalje lahko zapišemo trditev o nezmanjševanju prekritja: za vse programe $P = e_1 e_2 \ldots, e_n$ in vse $X, Y \subseteq V$ velja $|X^P \cap Y^P| \geq |X \cap Y|$. Dokaz te trditve sledi direktno iz trditve 1.

Naj bo $V_1, V_2 \subset V$, $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ in konfiguracija mehurčkov taka, da je $X_1 \subseteq V_1$ in $X_2 \subseteq V_2$. X_2 je kopija od X_2, če obstaja enolična preslikava med elementi iz X_1 in elementi iz X_2. Program P, ki ga je mogoče ponovno uporabiti (ponovno uporabljiv program P), je takšen program P, da za nek $V_1, V_2 \subset V$ z mehurčno konfiguracijo X_1 in V_1, P generira kopijo X_1 v V_2 tako, da se X_1 v V_1 ohrani. Lahko ugotovimo, da takšen ponovno uporabljiv program P, $P = e_1 e_2 \ldots e_n$ ne obstaja. Dokaz za gornjo trditev najdemo v /5/.

Iz trditve 3 lahko zaključimo, da izhodni indeks ne moremo realizirati samo z instrukcijami mehurčnega prenosa, in zato tudi ne vseh kombinacijskih funkcij. Lahko pa realiziramo operacije IN, ALI in NE, če uporabimo kodiranje, ki je ponazorjeno s sliko 9 /3/. Vendar so fizikalno možni tudi drugi tipi interakcij, ki jih dodamo našemu modelu, ne da bi prišli v nasprotje z realnostjo. Izhodni indeks implementiramo, če instrukcijem mehurčnih prenosov dodamo še tako imenovano "instrukcijo mehurčne podvojitve". Označimo jo z $e = (A,B)_s$ in naj velja:

$$X^e = X \cup \{B\}, \text{ če } A \in X, \; B \notin X$$
$$X^e = X, \quad \text{če } A \notin X \text{ ali } B \in X$$

Funkciji, ki sta po tej interakciji predstavljeni na lokacijah A in B, sta

$$a' = a$$
$$b' = a + b$$

Če v začetku B ne poseduje mehurčka, se po interakciji pojavi na izhodu spremenljivke a. Inicializacijo omogočimo z dvema dodatnima interakcijama: "generiranje mehurčka" in "destruiranje (anhilacija) mehurčka". Instrukcijo generiranja mehurčka označimo z $e = (1,A)$. Velja

$$X^e = X \cup \{A\}$$

Instrukcijo destruiranja mehurčka označimo z $e = (0,A)$. Velja

$$X^e = X - \{A\}$$

Na sliki 11 je prikazana razpredelnica vseh štirih tipov interakcij:

Ime	Opis	Lokacije z rezultirajočimi mehurčki
Prenos	$e = (A,B)$	$X^e = \begin{cases} (X - \{A\}) \cup \{B\}, \text{ če } A \in X, \; B \notin X \\ X, \text{ če } A \notin X \text{ ali } B \in X \end{cases}$
Podvojitev	$e = (A,B)_s$	$X^e = \begin{cases} X \cup \{B\}, \text{ če } A \in X \\ X, \text{ če } A \notin X \end{cases}$
Anhilacija	$e = (0,A)$	$X^e = X - \{A\}$
Generacija	$e = (1,A)$	$X^e = X \quad A$

Slika 11. Štirje tipi operacij nad mehurčki

Lahko bi dokazali, da z rabo vseh štirih tipov interakcij in zgoraj omenjenega kodiranja ne moremo še realizirati vseh kombinacij funkcij. Izjemoma pa, če obstajajo nekatere lokacije, na katere se lahko mehurčki začasno premaknejo. Velja /5/ naslednja trditev:

Kombinacijske funkcije so neizračunljive z vsemi štirimi tipi instrukcij (prenosa, podvojitve, anhilacije in generacije), če so informacije prisotne na vseh lokacijeh v V.

Gornja trditev velja tudi v primeru rabe kodiranja na sliki 9, kjer V vsebuje 2n lokacij z vrednostmi n spremenljivk. Program, ki bi uporabljal interakcije opisanih štirih tipov in omogočal komplementa vseh spremenljivk, ne obstaja. Pri tem se moramo zavedati, da smo pri preje izvajanem programu komplementiranja binarnih spremenljivk potrebovali tudi dodatne lokacije. Velja naslednja trditev:

Vse kombinatorne logične funkcije so izračunljive, če uporabljamo štiri tipe instrukcij, primerno kodiranje vhodov in, če je začasno potrebno dovolj veliko število lokacij. Dokaz najdemo v delu /5/.

5. ZAKLJUČEK

Pokazali smo, kako moremo logični element vsote po modulu 2 in element IN dveh spremenljivk realizirati z interakcijami magnetnih mehurčkov. Nadalje smo oblikovali matematični model takšnih interakcij. Čeprav zgoraj omenjena elementa še ne predstavljata polne množice osnovnih elementov, ki bi omogočali realizacijo poljubne kombinacijske funkcije, je vendar nekatere od teh mogoče realizirati z omenjenimi interakcijami. Pogoj obstaja le v možnosti generiranja mehurčkov (konstanta 1) in v možnosti realizacije izhodnega indeksa. Indeks moremo realizirati z interakcijo med lokacijama s konstanto 1 in spremenljivko x, če le-ta realizira izhoda x in $\bar{x}$. S ponavljanjem takih postopkov dobimo željeno število izhodov x. Pri tem pa ne potrebujemo nobenega kodiranja, saj so hkrati neposredno dosegljivi tudi komplementi $\bar{x}$ od x.

Medtem ko smo ugotavljali pogoje, ki so potrebni za realizacijo logičnih funkcij z mehurčnimi preklopnimi vezji, nismo obravnavali tudi število insturkcij, ki je potrebno za takšno realizacijo. Dodati pa moramo, da minimizacija števila instrukcij predstavlja poseben problem za učinkovito realizacijo logičnih funkcij.

6. LITERATURA

1) P. Kolbezen, R. Trobec, J. Šile, B. Miholović: Mehurčni pomnilniki, IJS Ljubljana, Raziskovalna študija, številka pogodbe: 03-BR-PK-1226/81, junij 81
2) Šile: Magnetni mehurčki v digitalni tehniki, magistrski delo, Univerza Edvarda Kardelja, Fakulteta za elektrotehniko, junij 1982
3) R. L. Graham: A Mathematical Study of a Model of Magnetic Domain Interactions, BSTJ, vol.49, pp.1627-1644, October 1970
4) R. C. Minnick: A System of Magnetic Bubble Logic, IEEE Trans. on Computers, vol. C-24, pp.217-218. February 1975
5) P. Kolbezen: Optimizacijski problemi mehurčne logike, IJS Delovno poročilo Dp- 2976, Ljubljana, december 82