Polymorfní elektronika a návrhové metody

Adam Crha
3.ročník, prezenční studium
Školitel: Richard Růžička

Fakulta informačních technologií, VUT v Brně
Božetěchova 2, Brno, 612 66, Česká republika
icrha@fit.vutbr.cz

***Abstrakt*—Práce popisuje výzkum týkající se nekonvenční elektroniky a návrhových metod. V úvodu jsou diskutovány principy, výhody a nevýhody nekonvenční elektroniky. Dále je pak představena polymorfní elektronika a její vlastnosti. Následuje popis metodiky, která navrhuje polymorfní obvody hledáním společných částí v termech. Je diskutován princip metody a její výsledky. Poslední kapitola lehce popisuje novou metodiku, která využívá kerneling a AIG.**

***Klíčová slova*—Polymorfismus, logický obvod, logická hradla, syntéza, metodika, AIG, kerneling.**

I. Úvod a motivace

Rozvoj číslicové techniky v šedesátých letech minulého století otevíral vědě nový, neprozkoumaný prostor. Nová technologie nabízela nové otázky, na které nebyly známé odpovědi. Vědci museli novou technologii poznávat a pozorovat chování nových materiálů, ze kterých byla vyrobena logická hradla. Jejich úkolem také bylo vymyslet vhodné nástroje, pomocí kterých se z hradel navrhovaly složitější číslicové obvody. Nyní, po více jak 60 letech existence číslicových obvodů, lze předpokládat, že jsou k dispozici ty nejlepší návrhové nástroje a chování číslicových je prozkoumáno do posledního detailu.

Ano, toto tvrzení je zcela pravdivé, hovoříme-li o běžných číslicových obvodech. Avšak v roce 2001 představil A. Stoica moderní pojem „polymorfní elektronika“, čímž otevřel další, nepříliš prozkoumanou, vědeckou oblast [1]. Jde o vícefunkční číslicové obvody, u kterých změna funkce není vyvolána přepínačem nebo rekonfigurací, jak je známo u konvenční elektroniky. Namísto toho je změna funkce vyvolána uvnitř číslicového obvodu v závislosti na externím prostředí (teplota, světlo, ...) [2]. Objev polymorfní elektroniky s sebou přinesl nové materiály, technologie a otázky týkající se efektivního návrhu polymorfních obvodů. Materiály, které dříve byly považovány za nestabilní a tudíž nepoužitelné, nacházejí uplatnění právě v polymorfní elektronice. Je možné sledovat značný pokrok ve vývoji grafenu, silikonových nanotrubiček a organických materiálů [3] [4]. Jedná se tak o velmi mladou věděckou disciplínu nabízející mnoho disertabilních témat.

Bohužel, konvenční návrhové metody a algoritmy nejsou dobře použitelné pro návrh polymorfních obvodů. Metody syntézy pro návrh polymorfních obvodů jsou mnohem složitější oproti metodám syntézy konvenční elektroniky. Touto problematikou se již zabývá několik vědců, avšak dosud vynalezené syntézní metody nejsou natolik efektivní, jako metody pro návrh konvenční elektroniky. Tato situace vyžaduje výzkum a vývoj nových, lepších a efektivnějších návrhových metod pro polymorfní obvody. Největší přínos polymorfní elektroniky je sledován ve sdílení prostředků realizovaných funkcí v co největší možné míře. Je snahou objevovat metody, které budou generovat polymorfní obvody splňující tento předpoklad. Syntézní algoritmy pracují s obvody, nejčastěji reprezentované pravdivostní tabulkou, logickým výrazem, či binárním rozhodovacím diagramem. Výstupem by měla být co nejjednodušší reprezentace obvodu [5].

Cílem této práce je obecně představit polymorfní elektroniku a její otevřené problémy (kap. II), je zmíněna návrhová technika polymorfních obvodů (kap. IV) a jsou diskutovány její výsledky. Nakonec je představena idea nové návrhové techniky pro polymorfní obvody (kap. V).

II. Polymorfní elektronika

Tato kapitola popisuje kritické shrnutí poznání v oblasti polymorfní elektroniky a specifikuje otevřené problémy k řešení.

Polymorfní elektronika je nová disciplína v oblasti elektronických systémů. Jak již bylo zmíněno v úvodu, objevil ji A. Stoica se svou výzkumnou skupinou v NASA (Jet Propulsion Laboratory), která se primárně zabývá výzkumem elektronických technologií pro dlouhé nepilotované kosmické mise, kde je nezbytná odolnost proti poruchám, jejich kompenzace, automatické přizpůsobení se tvrdým a extrémním podmínkám [1].

V oblasti počítačových systémů se polymorfní elektronikou rozumí elektronické číslicové obvody, které dokážou vykonávat více než jednu funkci, zatímco zapojení elektronického obvodu je stále stejné. Volba funkce, kterou obvod vykonává je závislá na stavu okolního prostředí (teplota, tlak, vlhkost, polarita napětí, ...). Všechny požadované funkce obvodu jsou navrženy úmyslně. Jedná se tak o požadované funkce obvodu, nikoliv například o poruchový stav vyvolaný překročením provozních parametrů obvodu. Stav okolního prostředí je možné přesně popsat, typicky nějakou fyzikální veličinou. Pak je možné pro konkrétní hodnotu této veličiny určit, jakou funkci bude polymorfní obvod realizovat [6] [1].

Typické vlastnosti polymorfních obvodů [7]:

1) Obecně se od polymorfních obvodů očekávají menší nároky na využitou plochu na čipu. Předpokládá se, že dvě různé funkce mohou sdílet některé společné části a tím uspořit značné množství prostředků.
2) Přepínání mezi funkcemi je závislé na stavu okolního prostředí, přepnutí je okamžité a není nutné čekat například na dokončení rekonfigurace.
3) Reakce na stav okolního prostředí je přirozenou vlastností obvodu. S tímto chováním je ve fázi návrhu nutno počítat.
4) Obvod reaguje na stav okolního prostředí globálně. Všechny prvky obvodu jsou o stavu prostředí informovány stejným způsobem. Jedná se tak o distribuovaný systém, nikoliv centralizovaný.

Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem polymorfních obvodů lze předpokládat, že tato vědecká disciplína, polymorfní elektronika, má jistý potenciál.

V následujících řádcích jsou definovány základní pojmy použité v této práci:

Definice 1. ***Digitální obvod*** *[7]*
Digitální obvod je možné reprezentovat acyklickým grafem $G = (V, E, \varphi)$, kde V je množina vrcholů (bran komponent obvodu), $E = \{(a, b)|a, b \in V\}$ je množina hran (spojů obvodu) a φ je zobrazení, které každému vrcholu z V přiřazuje komponentu z množiny K, $\varphi : V \to K$.

Definice 2. ***Polymorfní obvod*** *[7] [6]*
Polymorfní obvod je reprezentovaný acyklickým grafem $G = (V, E, \phi)$, kde V je množina uzlů (V/V hradel), $E = \{(a, b)|a, b \in V\}$ je množina hran (spojů) a $\phi = \{\varphi_1, ..., \varphi_n\}$ je množina zobrazení a platí $|\phi| > 1$. Každé zobrazení $\varphi_i \in \phi$, přiřazuje každému uzlu z V hradlo z množiny K, $\varphi_i : V \to K$ pro $\forall i = 0..n$.

Z uvedené definice plyne, že zapojení polymorfního obvodu (jednotlivých hradel / komponent), tedy graf G je stejný. Vlivem prostředí však může být ovlivněna výsledná funkce obvodu. Pak se musí měnit význam jednotlivých komponent uvnitř obvodu.

Tato definice zavádí zajímavý problém, a to: Jak nalézt ideální acyklický graf G?

III. Otevřené problémy

Na základě předchozích úvah vyplývají některé ne zcela vyřešené problémy:

1) Vyvinout vhodná hradla (na materiálové úrovni), které by byla schopna exaktně a předvídatelně reagovat na stav prostředí.
Těmito problémy se zabývají zejména vědci z chemických a elektrotechnických univerzit. K výzkumu materiálů a nových technologií mají vhodné laboratorní podmínky, díky čemuž je jejich výzkum podpořen. Poměrně zajímavými materiály se v současnosti jeví grafen, organické polovodiče, silikonové nanodrátky a mnoho dalších zajímavých polovodivých struktur ze kterých mohou být vytvořena polymorfní hradla [3] [4].
2) Vyvinout efektivní metodu pro návrh polymorfní obvodů. Tato metoda musí umět z polymorfních hradel sestrojit graf G, který reprezentuje zapojení obvodu. Obvod pak musí vykonávat požadovanou funkci v požadovaném okolním stavu prostředí.
Této problematice se intenzivně věnoval výzkumný tým prof. Sekaniny na Fakultě informačních technologií v Brně a učinili mnoho zajímavých objevů, které budou podrobně popsány např. v literatuře [8]

IV. Metodika hledáním společných částí v termech

Hlavní idea této návrhové metodiky spočívá v hledání společných částí obvodů tak, aby se společné části hledaly jako společné dělitele dvou různých termů popisující část obvodu [9] [10] [11].

Definice 3. ***Značení polymorfního multiplexoru:***
Nechť „(A|B)“ je výraz popisující část logického obvodu. „|“ je značka operátoru, značící dvouvstupý polymorfní multiplexor. „A“ je vstupní signál polymorfního multiplexoru, propagován na výstup v režimu 1, „B“ je vstupní signál polymorfního multiplexoru, propagován na výstup v režimu 2.

Princip metody v bodech:

1) Vstupem jsou již minimalizované výrazy v DNF popisující obě funkce.
2) Vytvoříme tabulku průniku o velikosti $m * n$, kde m je počet skupin termů F_1, n je počet skupin termů F_2. První sloupec bude obsahovat skupiny termů F_1, první řádek skupiny termů F_2.
3) Jednotlivá políčka tabulky vyplníme v tomto tvaru: *průnik skupiny termů (zbylé termy F_1 | zbylé termy F_2).*
4) Provádíme první průchod tabulkou. V tabulce hledáme políčka, která mají maximální průnik, tj. *minterm(1 | 1).* První nalezený minterm zapíšeme do výsledného výrazu. Nalezené mintermy mají obě funkce společný a proto není třeba, aby byl řešen polymorfně. Po zapsání mintermu do výsledného výrazu celý řádek a celý sloupec z tabulky vyškrtneme.
5) Provádíme další průchod tabulkou. V tabulce hledáme největší průnik. Políčko s největším průnikem opíšeme do výsledného výrazu a opět celý řádek a celý sloupec z tabulky vyškrtneme. *Poznámka: Pokud se v tabulce vyskytuje více políček s největším průnikem, zvolíme si*

heuristiku, která bude políčka vybírat - např. první, které je nalezeno.

6) Pokračujeme bodem 5, dokud jsou v tabulce nepokrytá políčka s alespoň nějakým průnikem. Pokud jsou všechny průniky pokryty, pokračuj dále.
7) Nyní se v tabulce nachází skupiny termů, které nemají společný dělitel - tedy nejsou nijak společné. Je nutné použít polymorfní multiplexor (ve výrazu značíme „|“), kterým se izoluje nesdílná část funkce F_1 a nesdílná část funkce F_2.

A. Experimenty s metodikou

Metodika pro návrh polymorfních obvodů, využívající tři typy polymorfních hradel, byla testována na 380 náhodně vygenerovaných obvodech seřazených do kategorií dle jejich hlavních parametrů: počet vstupních signálů, počet termů v disjunktivní normální formě a velikosti množiny ON-set vyjádřenou v procentech. Kategorie a specifikace testů jsou znázorněny v literatuře [11] v tabulce 1.

Průměrné výsledky metodiky je možné nalézt v literatuře [11] v tabulce 2, kde zeleně je zvýrazněn nejlepší výsledek a červeně nejhorší. Výsledek je znázorněn jako procentuální zlepšení ve srovnání s konvenční metodikou Espresso pro dvouvýstupové funkce. Po vynesení výsledků do grafu se ukázalo, že metodika je při zvětšujícím se počtu termů, či velikosti množiny ON-set málo škálovatelná [9] [10] [11].

V. Metodika návrhu využívající kerneling a AIG

Předchozí prezentovaná metoda disponuje dvěma nedostatky, kterými jsou špatná škálovatelnost a práce s dvouúrovňovou reprezentací obvodu. Proto je vhodné nadále pokračovat ve výzkumu návrhových technik a poučit se z předchozích problémů, na které jsme narazili dříve.

Obecně můžeme návrh polymorfních obvodů můžeme rozdělit na dvě části a to:

1) Nalezení společných částí, které budou řešeny konvenčně.
2) Spojení rozdílných částí v jednu pomocí polymorfních prvků.

V nově představené metodice budeme využívat tento model k návrhu polymorfních obvodů. K nalezení společných částí bude využita technika *kerneling*, zatímco k návrhu rozdílných částí využijeme vlastnosti And-Inverter Grafů (AIG).

A. Kerneling

Nyní je možné představit koncept takzvaného „kernelu“ algebraického výrazu, který je velice dobře dokumentován v této literatuře. [12] [13] [14]:

K nalezení společných částí využijeme techniku kerneling v neupravené formě. Společná část obvodu pak bude reprezentována jednotlivými, nalezenými kernely.

Definice 4. *Nechť krychle (angl. cube) je součin podmnožiny literálů funkce f.*

Nechť $D(f)$ je množina primárních dělitelů získaná podílem výrazu f všemi možnými krychlemi.

Nechť $K(f) \subseteq D(f)$ je množina kernelů výrazu f, kde všechny prvky jsou „cube-free“ (výraz bez krychle, tj. prvky již není možné dělit krychlí).

Kernel algebraického výrazu f je „cube-free“ výsledek, který vzniká po dělení výrazu f krychlí a výraz není možno dále dělit beze zbytku.

K tomu, abychom byli schopni nalézt kernely funkce, potřebujeme takzvaný co-kernel. Co-kernel je krychle, tedy součin podmnožiny literálů funkce f. Co-kernely je možné nalézt sestrojením cube-literální matice. Po získání co-kernelů již snadno získáme kernely vydělením výrazu co-kernelem. Více informací o principech nalezení kernelu je možné nalézt v literatuře [12].

Výraz, reprezentující logickou funkci, však může mít více kernelů. Největší problém vyplývá na povrch. Nalezení nejlepšího kernelu je klasifikováno jako NP těžký problém a proto se využívá heuristických metod. K nalezení nejlepších kernelů více funkcí se používá tabulka průniků kernelů (kernel-intersection table), která je taktéž dokumentována v [12].

Technika zvaná „kerneling“ nachází uplatnění v logické syntéze za účelem nalezení nejlepších dělitelů a proto se využívá k efektivní dekompozici/faktorizaci.

Příklad 1. *Mějme funkci $F = af + bf + ag + cg + ade + bde + cde$ a $G = af + bf + ace + bce + ade + cde$. S pomocí techniky kerneling dokážeme nalézt největší společné části:*

Společné části:

$X = a + b$
$Y = a + c$
$Z = de$

Rozdílné části:

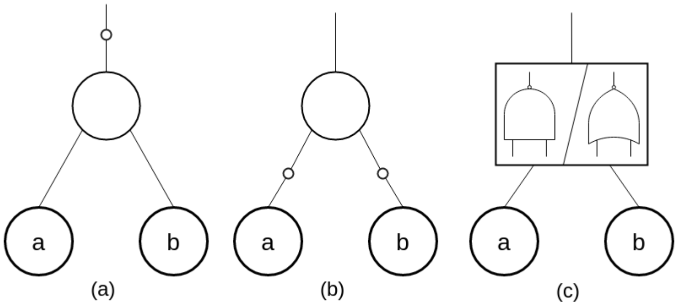
$F = ZX + fX + gY + cZ$
$G = fX + ceX + ZY$

Jak je možné spatřit na příkladu, kerneling je opravdu silným nástrojem k faktorizaci algebraických výrazů.

Algoritmus a příklady je možné nalézt v této publikaci [12].

B. AIG

V dnešní době jsou velmi populární takzvané And-Inverter grafy. Jedná se o orientované acyklické grafy využívající pouze dva typy uzlů, AND a invertor. kde invertor definován jako vlastnost hrany propojující dva uzly. Primární vstupy jsou terminály, primární výstup je reprezentován kořenem AIG. Jsou oblíbené zejména kvůli jejich jednoduchosti, což zajišťuje právě jeden typ uzlů a dva typy hran. Jsou univerzální, škálovatelné a flexibilní. AIG se také vyznačují tím, že jsou uniformní - mají pouze jeden typ uzlů. Mezi další výhody patří jednoduché operace nad grafem (balancování). AIG, stejně jako binární rozhodovací diagramy nabízejí hashování, tedy stejné podgrafy mohou být reprezentovány jedním podgrafem.



Obrázek 1. Princip mapování dvou AIG na polymorfní hradla. (a) NAND (b) NOR (c) namapované polymorfní hradlo.

K návrhu polymorfních obvodů nespolečných částí budeme využívat uniformitu AIG a sestrojíme tabulku vzorů polymorfních hradel, které máme k dispozici.

AIG vzor f_1	**AIG vzor f_2**	**Polymorfní hradlo**
AND	OR	AND/OR
XOR	NAND	XOR/NAND
a	b	poly mux
konstanta	identita	konstanta/identita
...	...	...

Tabulka I
TABULKA AIG VZORŮ MAPUJÍCÍ POLYMORFNÍ HRADLO, POUZE PŘÍKLAD.

Mějme funkce F a G z příkladu 1. Pro obě tyto funkce sestrojíme AIG. Poté, budeme procházet oba grafy od terminálních uzlů současně - tedy od stejných proměnných. Při procházení oběma sestrojenými AIG od jejich terminálů budeme vyhledávat shodu podgrafů v tabulce AIG vzorů, které odpovídají námi definovaným polymorfním hradlům.

Takto namapujeme dva různé AIG na jeden graf sestavený z polymorfních hradel. Vlastnosti AIG budou stále zachovány.

Tímto byl tedy představen koncept metodiky, jenž by měla být v dohledné době implementována do syntézního nástroje ABC.

VI. ZÁVĚR

Tato práce chronologicky popisuje průběh výzkumu týkající se polymorfní elektroniky. Nejdříve byly studovány principy polymorfní elektroniky na technologické úrovni, tedy elementárních prvků, ze kterých jsou tvořena hradla. Dále byly zmíněny techniky pro návrh polymorfních obvodů. Metodika, popsaná v kap. IV byla otestována na 380 náhodně vygenerovaných obvodech s různými parametry. Další metoda (kap. V), která je prozatím ve fázi návrhu a brzy se dočká implementace. Proto tato práce neobsahuje výsledky a srovnání. Informace získané o stávajících metodách napověděly, že syntéza polymorfních obvodů není stále ideální a je vyžadován další výzkum v oblasti návrhových technik polymorfních obvodů.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za podpory národního grantu COST Nekonvenční návrhové techniky pro číslicové obvody s vlastní rekonfigurací: od materiálů k implementaci (LD14055).

LITERATURA

[1] A. Stoica, R. Zebulum, and D. Keymeulen, "Polymorphic electronics. Proc. of Evolvable Systems: From Biology to Hardware Conference," vol. 2210 of LNCS, pp. 291–302, 2001.
[2] A. Stoica and R. S. Zebulum, "Multifunctional logic gate controlled by temperature. ," p. 18, 2005.
[3] H. Raza, "Graphene Nanoelectronics: Metrology, Synthesis, Properties and Applications. ," 2012.
[4] J. Morris and K. Iniewski, "Nanoelectronic Device Applications Handbook ," 2013.
[5] P. Fišer, "Randomized Iterative Logic Synthesis Algorithms ," p. 84, 2012.
[6] A. Crha, "Polymorfní elektronika a metody syntézy." *Sborník příspěvků PAD2014*, vol. 2014, no. 1, pp. 57–62, 2014.
[7] R. Růžička, "Polymorfní elektronika." p. 118, 2011.
[8] Z. Gajda, "Evolutionary Approach to Synthesis and Optimization of Ordinary and Polymorphic Circuits ," 2011.
[9] A. Crha, R. Růžička, and V. Šimek, "Novel Approach to Synthesis of Logic Circuits Based on Multifunctional Components. ," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 29–35, 2016.
[10] A. Crha, R. Růžička, and Šimek, "On the Synthesis of Multifunctional Logic Circuits." pp. 52–53, 2015.
[11] A. Crha, R. Růžička, and V. Šimek, " Toward Efficient Synthesis Method of Multifunctional Logic Circuits." pp. 21–24, 2015.
[12] G. D. Hachtel and F. Somenzi, " Logic Synthesis and Verification Algorithms ," p. 564, 1996.
[13] R. Brayton and C. McMullen, " The Decomposition and Factorization of Boolean Expressions," 1982.
[14] S. Hassoun and T. Sasao, "Logic Synthesis and Verification ," p. 454, 2002.