PROSTŘEDKY A METODY PRO AUTOMATICKÉ VYTVÁŘENÍ TESTOVACÍCH OBVODŮ

Tomáš Pečenka
Informační technologie, 2. ročník, prezenční studium
Školitel: Zdeněk Kotásek

Fakulta informačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
Božetěchova 2, Brno 612 66, Czech Republic

pecenka@fit.vutbr.cz

Abstrakt. Tato práce se zabývá využitím evolučních algoritmů pro automatický návrh testovacích obvodů. Hlavním cílem práce je ukázat, že je možné za pomoci evolučních technik vytvářet relativně velké a složité testovací obvody, pokud se bere v úvahu pouze určitá vlastnost obvodu (v našem případě testovatelnost) a funkce obvodu není při vytváření obvodu uvažována. Uvedený princip je demonstrován na automatickém návrhu testovacích obvodů s požadovanou strukturou a diagnostickými vlastnostmi. Navržená metoda umožňuje vytvářet obvody na úrovni meziregistrových přenosů o složitosti až několik tisíc prvků s požadovanými diagnostickými vlastnostmi.

Klíčová slova. Evoluční návrh, testovatelnost, testovací obvod.

1 Úvod

Pokud se zabýváme vývojem nových metod a nástrojů, ať již v oblasti návrhu snadno testovatelných obvodů (popř. návrhu elektronických obvodů obecně), potřebujeme mít k dispozici množinu testovacích úloh, na níž bychom měli možnost ověřit, že námi navržená metoda funguje podle našich předpokladů, popř. bychom měli možnost porovnat námi dosažené výsledky s výsledky jiných autorů. Pro tyto účely jsou k dispozici sady testovacích obvodů, které umožňují "objektivní" srovnání různých metod a nástrojů [3].

V současné době existuje relativně velké množství testovacích sad určených pro ověřování diagnostických metod a nástrojů (viz např. [3–6]). Testovací obvody obsažené v těchto sadách můžeme rozdělit podle úrovně popisu do následujících tříd: testovací obvody na úrovni logických členů, úrovni meziregistrových přenosů (*Register Transfer – RT*) a ostatních úrovních popisu (např. obvody SoC).

Pokud bychom se zabývali analýzou dostupných testovacích obvodů na úrovni meziregistrových přenosů, zjistíme, že máme k dispozici pouze 31 relativně jednoduchých testovacích obvodů v sadě ITC'99. Nejsložitější obvod[1] *b15_1* této sady má 36/70 primárních vstupů/výstupů a skládá se z 13 098 hradel a 449 D klopných obvodů (D-KO). Testovací obvody této složitosti však již nereprezentují dnešní číslicové obvody, jejichž složitost se pohybuje v řádu miliónů hradel.

V poslední době se jako možná alternativa k tradičním testovacím obvodům začínají prosazovat tzv. syntetické testovací obvody. Cílem této práce je představit metodu automatického vytváření syn-

[1] Sada ITC'99 obsahuje i složitější obvody. Tyto obvody ale vznikly pouhou kompozicí jednodušších obvodů této testovací sady.

tetických testovacích obvodů s požadovanou strukturou a diagnostickými vlastnostmi. Struktura práce je následující. Nejprve je ve druhé části krátce představena problematika syntetických testovacích obvodů a evolučního návrhu obvodů. Třetí část se podrobně věnuje navržené metodě návrhu testovacích obvodů. Ve čtvrté části jsou představeny dosažené výsledky. Cílům disertační práce je věnována závěrečná část.

2 Syntetické testovací obvody a evoluční návrh

Syntetické testovací obvody se v poslední době začínají prosazovat jako možná alternativa klasických testovacích obvodů. Hlavní výhodou syntetických testovacích obvodů je možnost plné kontroly nad důležitými charakteristickými vlastnostmi těchto obvodů, jako je například jejich velikost, struktura spojů, popř. funkce. V ideálním případě je možné jednotlivé parametry volit nezávisle na sobě a získáváme tak plnou kontrolu granularity vytvářených obvodů.

Na základě dosavadních výsledků v oblasti syntetických testovacích obvodů se nabízí otázka, jestli by nebylo možné vytvářet syntetické testovací obvody s požadovanými vlastnostmi z hlediska struktury obvodu a testovatelnosti. Všechny dosud publikované metody ale využívají pro návrh obvodů heuristické metody. Tyto metody však není možné, vzhledem ke komplexnosti parametrů testovatelnosti, v našem případě použít. Jednou z možností, jak realizovat návrh číslicových systémů může být například tzv. evoluční návrh. Princip této metody návrhu je založen na použití evolučního algoritmu pro iteračně založené hledání takového obvodu, který nejlépe odpovídá požadavkům návrháře specifikovaných ve formě hodnotící fitness funkce.

Důvodů použití evolučního návrhu pro návrh číslicových obvodů je hned několik. Jedna z výhod tohoto přístupu spočívá v tom, že evoluce umožňuje navrhovat obvody, které jsou mimo možnosti konvenčního návrhu. To je umožněno odstraněním omezení, která jsou součástí tradičního návrhu, tj. nepoužitím klasických návrhových technik založených na dekompozici a minimalizaci a odstraněním předsudků, které vnáší sám návrhář. Další výhodou tohoto přístupu je, že uživatel nemusí specifikovat, jakým způsobem se má daný obvod vytvořit, ale pouze specifikuje jak se má navržený obvod chovat, popř. jaké má mít vlastnosti.

Použití evolučního návrhu v diagnostice není žádnou novinkou. Zatím však není znám žádný přístup, který by využíval evoluční návrh pro vytváření testovacích obvodů. Vzhledem k potřebě testovacích obvodů s danou strukturou a danými diagnostickými vlastnostmi a neexistenci metody, která by takovéto obvody umožňovala vytvářet, vznikla myšlenka využití evolučního návrhu pro vytváření syntetických testovacích obvodů. V rámci této práce pak byla navržena metoda evolučního návrhu syntetických testovacích obvodů s danou strukturou a diagnostickými vlastnostmi. Představením navržené metody se zabývá tento příspěvek.

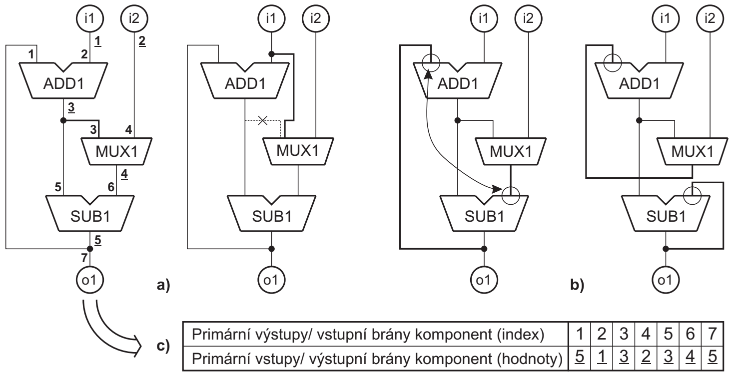
3 Metoda návrhu testovacích obvodů

Vstupem navržené metody jsou (1) požadavky na testovatelnost obvodu vyjádřené ve formě parametrů řiditelnosti a pozorovatelnosti (viz. [7]), (2) parametry použitého optimalizačního algoritmu a (3) požadavky na strukturu obvodu ve formě počtu primárních vstupů/výstupů obvodu a počtu a typu obvodových prvků. Vlastní evoluční návrh probíhá nad strukturou obvodu tvořenou spoji a požadovanými prvky z knihovny základních komponent úrovně RT (sčítačky, násobičky, dekodéry, . . .).

3.1 Evoluční návrh

Evoluční návrh obvodů je možné chápat jako optimalizační proces, během něhož se hledá optimální řešení daného problému z hlediska hodnoty fitness funkce. V našem případě optimalizační algoritmus pracuje nad reprezentací obvodu na obrázku 1. Jako optimalizační algoritmus byl použit algoritmus evolučního programování.

Vytvářený obvod se skládá z uživatelem specifikovaných prvků, jejichž vstupy a výstupy (společně s primárními vstupy a výstupy obvodu) jsou unikátně označeny. Vzhledem k tomu, že předpokládáme, že obvod neobsahuje obousměrné brány, může být propojení prvků obvodu reprezentovaného jako pole pevné velikosti (viz obrázek 1c). Vstupní brána tvoří index v tomto poli a hodnota prvku na daném indexu představuje výstupní bránu, na níž je vstupní brána připojena[2].



Primární výstupy/ vstupní brány komponent (index)	1	2	3	4	5	6	7
Primární vstupy/ výstupní brány komponent (hodnoty)	5	1	3	2	3	4	5

Obrázek 1: Operátory mutace (a), (b). Reprezentace obvodu v chromozomu (c).

Základem použitého přístupu je operátor mutace, který je použit pro modifikaci spojů vytvářeného obvodu. Navržená metoda využívá v současné době dva různé operátory mutace. Při prvním typu mutace (obrázek 1a) je náhodně vybrána brána obvodu a tato vybraná brána je připojena k jinému náhodně vybranému spoji se stejnou šířkou. Pokud je použit druhý typ mutace (obrázek 1b), jsou náhodně vybrány dvě vstupní brány obvodu se stejnou šířkou a spoje, které jsou připojeny k těmto branám, jsou vzájemně přepojeny.

3.2 Ohodnocení obvodu

Ohodnocení kvality obvodu probíhá ve třech krocích: (1) ohodnocení struktury obvodu – parametr *structure*, (2) ohodnocení propojení prvků obvodu – parametr *connects* a (3) ohodnocení testovatelnosti obvodu – parametr *testability*. **Ohodnocení struktury obvodu** je dáno následujícím vztahem:

$$structure = 1 - \frac{useless\_comps}{comps\_count} \tag{1}$$

kde *useless_comps* představuje počet izolovaných prvků obvodu[3] a *comps_count* počet všech prvků obvodu. Hodnota parametru $structure$ je reálné číslo v rozsahu $\langle 0; 1 \rangle$. Pokud jsou v obvodu nalezeny izolované prvky, je další ohodnocení fitness zastaveno, hodnota parametrů $connects$ a $testability$ je nastavena na hodnotu 0 a výsledná fitness je dána vztahem 4. V opačném případě následuje analýza spojů obvodu a testovatelnosti.

Cílem **analýzy spojů obvodu** je ohodnocení variability spojů obvodu. Spoje jsou analyzovány s cílem identifikovat komponenty, jejichž vstupy jsou spojeny ($short\_cuts$) a s cílem identifikovat přímé spoje z primárních vstupů na primární výstupy obvodu ($direct\_connects$). Parametr $comp\_inputs$ (resp. $pri\_outputs$) představuje počet vstupních bran v obvodu (resp. počet primárních výstupů obvodu). Hodnota parametru $connects$ je ohodnocena reálným číslem z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$.

[2]Primární vstupy obvodu v tomto případě chápeme z hlediska vnitřní struktury obvodu jako výstupní brány a primární výstupy obvodu jako brány vstupní.

[3]Izolovaným prvkem se rozumí prvek, jež svými výstupy nijak neovlivňuje výstup obvodu. Takový prvek by byl odstraněn během procesu syntézy výsledného obvodu.

$$connects = 1 - \frac{short\_cuts + direct\_connects}{comp\_inputs + pri\_outputs} \quad (2)$$

Po analýze struktury spojů následuje **analýza testovatelnosti obvodu**. Parametry testovatelnosti obvodu jsou analyzovány s využitím algoritmu [7]. Algoritmus umožňuje ohodnocení průměrné řiditelnosti ($avg\_cont.$) a pozorovatelnosti ($avg\_obs.$) kandidátního obvodu s lineární časovou složitostí vzhledem k počtu spojů obvodu. Hodnoty získané na základě analýzy testovatelnosti obvodu jsou následně porovnány s hodnotami řiditelnosti ($req\_cont.$) a pozorovatelnosti ($req\_obs.$) požadované uživatelem. Hodnota parametru $testability$ je reálné číslo z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$.

$$testability = 1 - \frac{(req\_cont. - avg\_cont)^2 + (req\_obs. - avg\_obs.)^2}{2} \quad (3)$$

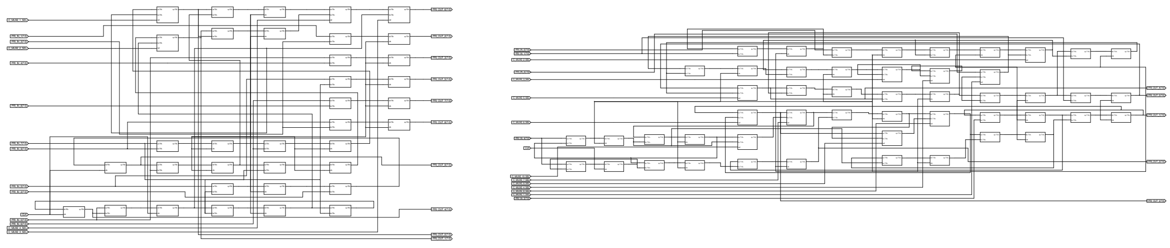
Výsledná hodnota fitness je dána vztahem 4, který kombinuje hodnoty jednotlivých parametrů obvodu. Hodnota fitness je v rozsahu $\langle 0; 1 \rangle$.

$$fitness = 0,25 \cdot structure + 0,25 \cdot connects + 0,5 \cdot testability \quad (4)$$

4 Výsledky experimentů

Byla provedena řada experimentů s cílem zjistit možnosti a nejvhodnější parametry evolučního algoritmu. Následující odstavce představují výběr provedených experimentů. Výsledky dalších experimentů je možné nalézt například v [1, 2].

První experiment byl zaměřen na ověření návrhové metody a ověření syntetizovatenosti vytvářených obvodů. Na obrázku 2(a) a 2(b) jsou ukázky testovacích obvodů vytvořených navrženou metodikou. Obvod na obrázku 2(a) je tvořen 20-ti prvky. Pro jeho implementaci v Xilinx Virtex II FPGA bylo požadováno 83 základních jednotek (tzv. *slice*). Uživatel požadoval vytvořit obvod s 80% řiditelností a 80% pozorovatelností. Pozorovatelnost vytvořeného obvodu je 80.6% a řiditelnost 74.5%. Obvod na obrázku 2(b) je tvořen 30-ti prvky. Pro jeho implementaci v Xilinx Virtex II FPGA bylo požadováno 139 základních jednotek. Uživatel požadoval vytvořit obvod s 20% řiditelností a 33% pozorovatelností. Pozorovatelnost vytvořeného obvodu je 20.4% a řiditelnost 36.7%. Je možné si všimnout, že na obrázcích je ve skutečnosti více prvků. Jedná se o registry, které byly do obvodu vloženy automaticky návrhovou metodou tak, aby kombinační cesta v obvodu mezi dvěma registry byla tvořena vždy maximálně dvěma prvky a byl použit co nejmenší počet registrů.

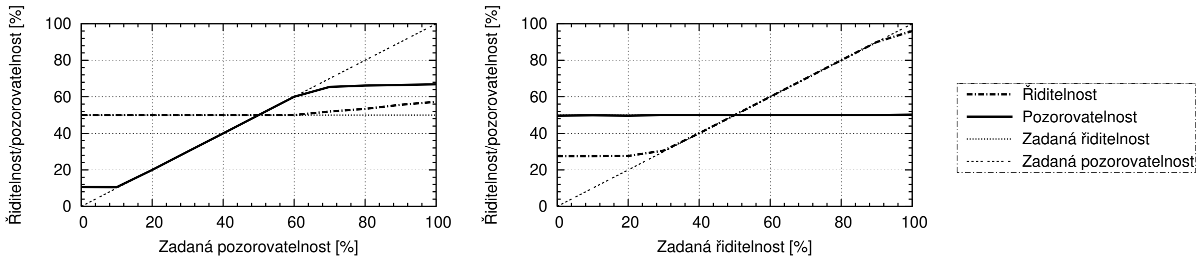


(a) (b)

Obrázek 2: Příklady evolucí nalezených obvodů: (a) 20 prvků (b) 30 prvků

Cílem dalšího experimentu bylo zjistit v jakém rozsahu je navržená metoda schopna plnit uživatelem specifikované požadavky. Experiment byl realizován na 50-ti prvkovém obvodu. Evoluční algoritmus byl spuštěn s následujícími parametry: velikost populace byla 30 jedinců, bylo vytvořeno 200 generací, pravděpodobnost mutace byla nastavena na 2%, v každé populaci bylo nahrazeno 95% rodičů.

Výsledky byly získány jako průměrná hodnota z 20 nezávislých spuštění. Na strukturu obvodu byly kladeny následující požadavky: 8 primárních vstupů a výstupů, 50 prvků: 8xADD(8bitů), 8xSUB(8bitů), 8xMUX2(8bitů), 8xADD(16bitů), 8xSUB(16bitů), 8xMUX2(16bitů) a 2xMUL(8,16bitů). Požadavky z hlediska testovatelnosti: (a) 50% řiditelnost (pevná), požadovaná pozorovatelnost je inkrementována s krokem 10%, (b) 50% pozorovatelnost (pevná), požadovaná řiditelnost je inkrementována s krokem 10%



(a) pevná řiditelnost (=50%) (b) pevná pozorovatelnost (=50%)

Obrázek 3: Rozsah plnění uživatelem zadaných požadavků pro pevnou hodnotu (a) řiditelnosti a (b) pozorovatelnosti

Z výsledků na obrázku 3 je patrné, že návrhová metoda je schopna plnit požadavky uživatele pouze na určitém rozsahu parametrů řiditelnosti a pozorovatelnosti obvodu. Velikost tohoto rozsahu je dána strukturními vlastnostmi obvodu (počet primárních bran, počet a diagnostické vlastnosti použitých prvků).

Třetí experiment byl zaměřen na zjištění, do jaké míry je navržená metoda schopna plnit požadavky uživatele při různé složitosti obvodů. Nastavení parametrů evolučního algoritmu bylo stejné jako u předcházejícího experimentu. Uživatel požadoval 30% řiditelnost a pozorovatelnost uzlů obvodu. Výsledky experimentu získané na počítači s procesorem Intel Xeon 2.8GHz a 1GB RAM jsou uvedeny v tabulce 1.

Požadavky		**Výsledky**				
Vst./Výst.	**# prvků**	**Řiditelnost**	**Pozorovatelnost**	**# hradel**	**D-KO**	**Čas [hh:mm]**
5/5	50	33,32%	32,89%	7 003	640	00:09
10/10	100	31,61%	29,82%	14 178	1 312	00:16
40/40	500	34,75%	29,52%	70 655	6 510	02:50
100/100	1 000	34,87%	26,79%	144 182	13 193	12:20

Tabulka 1: Splnění požadavků pro různé složitosti vytvářených obvodů.

5 Cíle disertační práce

V předcházejících částech této práce byly představeny dosažené výsledky v oblasti evolučního návrhu testovacích obvodů s požadovanými diagnostickými vlastnostmi. Na základě dosavadních dosažených výsledků byla zformulována následující hypotéza: *"Metodu evolučního návrhu je možné využít pro automatický návrh testovacích obvodů s požadovanými vlastnostmi z hlediska testovatelnosti"*. Cílem disertační práce je potvrzení (popř. vyvrácení) této hypotézy. Potvrzení hypotézy představuje splnění některých dílčích cílů.

Jedním z těchto cílů je návrh metodiky analýzy testovatelnosti, která by umožnila efektivní ohodnocení testovatelnosti obvodu. V rámci dosavadních experimentů realizovaných s cílem ověřit možnosti návrhové metody byl pro analýzu testovatelnosti použit algoritmus představený v [7]. Pro účely evolučního návrhu by však bylo vhodnější navrhnout **inkrementální metodu analýzy testovatelnosti** (analýza testovatelnosti pouze změněných částí obvodu). Návrh této metody a její formální popis je jedním z cílů další práce.

Důležitou částí návrhu testovacích obvodů je také posouzení kvality obvodu z hlediska jeho struktury. V rámci dosavadní práce byla pod pojmem struktury obvodu chápána informace o typu a počtu prvků obvodu, počtu primárních vstupů a výstupů obvodu a výsledcích jednoduché analýzy spojů obvodu. Z hlediska praktického využití testovacích obvodů, kdy se vyžaduje určitá relace mezi vytvářenými syntetickými testovacími obvody a reálnými obvody, by bylo vhodné, v rámci procesu ohodnocení struktury obvodu, analyzovat také další strukturní parametry obvodu jako např. rozložení délky kombinačních cest, stupeň větvení obvodu, splnění Rentova kritéria, apod.

Samostatnou kapitolu práce pak tvoří experimentální ověření navržené metody. Ověření návrhové metody bude rozděleno do dvou kroků. První krok bude zaměřen na ověření správné činnosti optimalizačního algoritmu, volbu vhodných parametrů a ověření návrhové metody. Další krok bude zaměřen na kvalitu vytvářených testovacích obvodů. Ověření jejich kvality bude realizováno za použití profesionálních nástrojů fy Mentor Graphics. Možnost realizace navržených obvodů a splnění požadavků na strukturu obvodu bude ověřena pomocí nástroje *Leonardo Spectrum*. Diagnostické vlastnosti obvodu budou ověřeny nepřímo na základě výsledků generátoru testu - nástroje *DFTAdvisor*.

6 Závěr

Tento příspěvek se zabýval představením metody umožňující návrh syntetických testovacích obvodů s požadovanými vlastnostmi z hlediska struktury a diagnostických vlastností obvodu. Byly představeny dosavadní výsledky v této oblasti a představeny cíle další práce. Dosavadní výsledky byly kladně hodnoceny jak z hlediska možnosti využití vytvořených testovacích obvodů pro ověřování metod a nástrojů v diagnostice (výsledky prezentovány na odborné konferenci zaměřené na diagnostiku elektronických obvodů [2]) tak z hlediska použité metody návrhu (výsledky prezentovány na odborné konferenci zaměřené na evoluční návrh elektronických obvodů [1]).

Literatura

[1] Pečenka, T., Kotásek, Z., Sekanina, L., Strnadel, J.: Automatic Discovery of RTL Benchmark Circuits with Predefined Testability Properties. In *Proc. of the 2005 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware*. Los Alamitos, Washington, USA, IEEE CS, 2005, s. 51-58.

[2] Kotásek, Z., Pečenka, T., Sekanina, L., Strnadel, J.: Evolutionary Design of Synthetic RTL Benchmark Circuits. In *Informal proceedings of 9th IEEE European Test Symposium*. Montpellier, France, IEEE CS, 2004. s. 107–108.

[3] Harlow, J.: Overview of Popular Benchmark Sets. *In: IEEE Design & Test of Computers*, Vol. 17, No. 3, 2000, s. 15–17.

[4] Brglez, F., Fujiwara, H.: A Neutral Netlist of 10 Combinational Benchmark Circuits and a Target Simulator in Fortran. In *Proceedings International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Kyoto, Japan, 1985, s. 695–698.

[5] Brglez, F., Bryan, D., Kozminski, K. Combinational Profiles of Sequential Benchmark Circuits. In *Proceedings International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Portland, OR, 1989, s. 1924–1934.

[6] Davidson, S.: Characteristics of the ITC'99 Benchmark Circuits. In *IEEE International Test Synthesis Workshop (ITSW)*, Santa Barbara, CA, 1999, 19 stran.

[7] Strnadel, J.: Analýza a zlepšení testovatelnosti číslicového obvodu na úrovni meziregistrových přenosů [disertační práce]. FIT VUT v Brně, 2004, 150 stran.