Roman Pniewski, Michał Dobrzański

Bezpieczeństwo jednokanałowych układów sterowania zrealizowanych w logice odwracalnej

JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2018.462
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówiony został, opracowany przez autorów sposób kontroli poprawnej pracy układu sterowania wykorzystującego bramki odwracalne. Logika odwracalna pozwala na konstruowanie, odpornych na błędy systemów cyfrowych. Autorzy zaproponowali poprawiona metodę kontroli z dynamiczną zmianą sygnałów kontrolnych, co może w istotny sposób podnieść bezpieczeństwo.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, logika odwracalna, niezawodność.

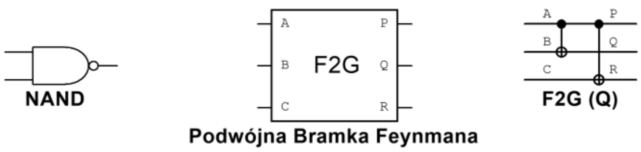
Wstęp

W wielu różnych dziedzinach, i sytuacjach z życia codziennego, mamy do czynienia z układami sterowania. Ich przeznaczenie i budowa nie zawsze muszą być niezwykle zaawansowane. Trudno jednak nie zauważyć, że w pewnych miejscach posiłkujemy się nimi, aby zapewniać bezpieczeństwo – jak np. w ruchu kolejowym, drogowym, lotniczym czy morskim. Z uwagi na ich bardzo istotną rolę należałoby zadbać o to, by zawsze pracowały sprawnie i bezbłędnie wykonywały powierzone im zadanie. Niestety, w świecie rzeczywistym, jest bardzo niska szansa na osiągnięcie stuprocentowej sprawności i bezawaryjności. Pomijając kwestię zużycia elementów i zmęczenia materiału, należy uwzględnić przypadki zdarzeń o charakterze losowym, których często nie sposób przewidzieć. Dlatego w sytuacjach, gdy w grę wchodzi ludzkie życie, stosuje się różne metody sprawdzania poprawności przetwarzanych informacji (przez porównywanie obliczeń z dwóch niezależnych maszyn/układów), czy popularnie stosowaną w bezpiecznych systemach sterowania redundancję systemów, aby w razie ewentualnej awarii jednego z układów możliwe było zapewnione bezpieczeństwo. Stosując jednak elementy, które wywodzą się z logiki odwracalnej, otwierają się nowe możliwości sprawdzania poprawności wykonywanych działań i dokładnego wykrywania błędów. W tym artykule pokazano klasyczne podejście do zapewniania bezpieczeństwa i porównano je z możliwościami elementów odwracalnych znanymi z literatury, jak również uzupełniono je rozwiązaniami autorskimi. Sporządzony artykuł prezentuje koncepcję nowego podejścia do zagadnień bezpiecznego sterowania przy wykorzystaniu układu zrealizowanego w jednym kanale . Dla ułatwienia, omawiany układ będzie prostym układem kombinacyjnym. Testy i analizy przeprowadzone zostały w środowisku programowym NI Multisim 14.0 uzupełnionym (przez autorów) o brakujące w standardowej bibliotece bramki odwracalne.

1.Porównanie podstawowych elementów logiki klasycznej i odwracalnej

Ponieważ cały czas poruszamy się w tej samej przestrzeni obliczeniowej, cały czas obowiązują nas prawa algebry Boole'a. Mimo swoich korzeni sięgających fizyki kwantowej i przetwarzania kwantowego, elementy logiki odwracalnej równie sprawnie radzą sobie przy manipulowaniu tylko 2 różnymi wartościami. Trzeba jednak już na początku zwrócić uwagę na zasadniczą odmienność elementów klasycznych i odwracalnych. Już jedno spojrzenie na rysunek 1, przedstawiający porównanie bramki klasycznej i odwracalnej, ujawnia, że w przeciwieństwie do elementów klasycznych, bramki odwracalne mają więcej wyjść. Dokładnie rzecz ujmując, mają dokładnie tyle samo wejść i wyjść. Ze względu na taką budowę, po wykonaniu operacji logicznej nie tracimy informacji. Po wartościach otrzymanych na wyjściach bramki dokładnie możemy powiedzieć, co było obecne na jej wejściach. W przypadku większości elementów klasycznych nie możemy mieć takiej pewności. Wystarczy zastanowić się nad działaniem sumy logicznej (bramka AND) dla dwóch wartości – jest jedna sytuacja, w której na wyjściu otrzymamy „0" i aż 3 przypadki, kiedy będzie to „1". W ten sposób straciliśmy jeden bit informacji, który zgodnie z przewidywaniami Landauera przemieni się w co najmniej kT ln2 dżuli energii (gdzie k to stała Boltzmanna, a T jest temperaturą otoczenia). Jednak zmniejszenie traconej energii nie jest najistotniejsze w tych rozważaniach (chociaż ilość traconej energii ma wpływ na niezawodność układów elektronicznych wskutek zmian temperatury).

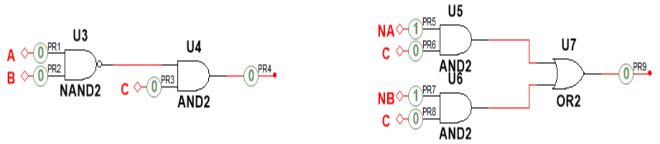
Drugą, zasadniczą różnicą – na którą sama nazwa wskazuje – jest możliwość działania bramki odwracalnej w obu kierunkach. Jest to istotna cecha, która pozornie może nie wydawać się bardzo istotna, jednak zostanie wykorzystana w przykładzie, gdzie zostanie dokładniej omówiona. Jednak już warto zauważyć, że ten sposób funkcjonowania jest jednym z utrudnień podczas prób fizycznej realizacji tego typu bramek.



Rys. 1. Przykład klasycznej bramki NAND oraz odwracalnej podwójnej bramki Feynmana (w notacji zwykłej i kwantowej)

2.Przykładowy układ sterowania

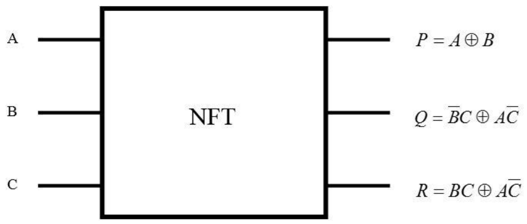
Jak wspomniano we wprowadzeniu, dla uproszczenia rozważań pokaano metody wykrywania błędów oraz zabezpieczenia układu na prostym układzie kombinacyjnym. Posiada on 3 wejścia (A, B i C) i jedno wyjście. Realizowaną funkcję można zapisać w postaci $\overline{A\cdot B}\cdot C$. Znając zależności algebry Boole'a, przedstawioną zależność można zapisać jako $(\overline{A}+\overline{B})\cdot C$ lub $\overline{A}\cdot C+\overline{B}\cdot C$. W żadnym wypadku nie ulega zmianie wynik operacji, jednak tego typu przekształcenia pokazują, że korzystając z klasycznych bramek możemy zrealizować układ na kilka różnych sposobów. Dwa z nich widoczne są na rysunku 2. W przypadku bramek odwracalnych sytuacja jest nieco bardziej złożona. Ze względu na swoją budowę, nie ma prostej możliwości zrealizowania nawet tak łatwej zależności. Żeby bramka mogła spełniać funkcje pomocne przy realizacji przykładowego układu, muszą posiadać co najmniej 3 wejścia oraz 3 wyjścia (czyli zgodnie z literaturą mieć rozmiar 3*3). Dopiero w takich przypadkach mamy do dyspozycji funkcje logiczne, które umożliwią realizację zadanej funkcji Nie trudno się również domyślić, że przy bramkach odwracalnych będziemy mieli więcej wyjść, niż jest nam potrzebne z punku widzenia prowadzonych obliczeń. Pozostałe wyjścia, których wartości nie są niezbędne dla zadania, zwykle określane są jako śmieciowe (ang. garbage). Jednak pokazano w dalszej części artykułu, nie zawsze tak musi być.



Rys. 2. Dwie możliwości zrealizowania przedstawionej funkcji

W literaturze można znaleźć wiele przykładów bardzo pomocnych, użytecznych i uniwersalnych bramek odwracalnych. Do najbardziej znanych należą bramki: Toffoliego, Feynmana, Peresa i Fredkina. Jednak nie wszystkie elementy są sobie równe. Chcąc wykorzystać bramki do budowy układu – nawet prostego – który pomoże nam podnieść bezpieczeństwo, ułatwiając wykrywanie błędów, należy skupić uwagę na bramkach zachowujących parzystość. W wielu sytuacjach, gdzie mamy do czynienia z przesyłaniem sygnałów i informacji cyfrowo, kontrola parzystości okazuje się bardzo przydatną i użyteczną techniką. A dzięki użyciu odpowiednich elementów do budowy układu, będzie możliwość skorzystania z niej w trochę innym środowisku.

Jest kilka przykładów bramek odwracalnych zachowujących parzystość, które znane są od dawna (jak podwójna bramka Feynmana, czy Fredkina), jednak w ostatnich latach pojawiają się nowe koncepcje (jak nowa bramka odporna na błędy, czy bramka Islama). Dając szansę nowszym rozwiązaniom, w dalszej części przykładu będzie używana nowa bramka odporna na błędy (ang. New Fault Tolerant), którą przedstawia poniższy rysunek oraz tabela prawdy.



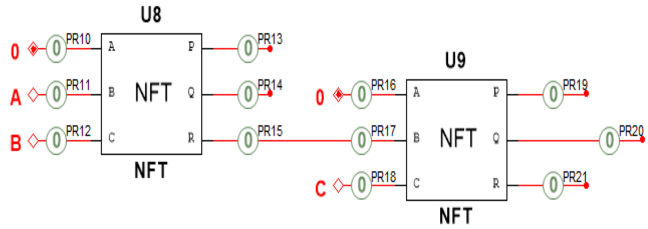
A	B	C	P	Q	R
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	1	1
1	1	1	0	0	1

Rys. 3. Bramka New Fault Tolerant 3*3 wraz z tabelą prawdy

Patrząc na tabelę prawdy nie trudno zauważyć, że wybrana bramka spełnia kryterium zachowania parzystości. Wykonując operację alternatywy rozłącznej dla wszystkich wartości na wejściu bramki ($A \oplus B \oplus C$) i porównując ją z takim samym działaniem dla wyjść ($P \oplus Q \oplus R$), zawsze powinniśmy otrzymać równość. Zależność ta okaże się bardzo pomocna przy określaniu poprawności działania poszczególnej bramki. Nie można jednak przeoczyć faktu, że bramka NFT nie realizuje wprost żadnej z funkcji koniecznych do realizacji przykładowej zależności. Konieczne będzie zastosowanie techniki popularnej przy tworzeniu układów odwracalnych, a mianowicie zastąpienie jednego z wejść bramki wejściem o stałej wartości. Wówczas uda nam się wpłynąć na postać zależności określających wszystkie wyjścia. Poniższe zależności pokazują, że dla otrzymania iloczynu, jak również iloczynu i negacji jednej z wartości konieczne jest ustawienie wejścia A na wartość „0”.

$$P = A \oplus B = 0 \oplus B = B$$
$$Q = \overline{B}C \oplus A\overline{C} = \overline{B}C \oplus 0 \cdot \overline{C} = \overline{B}C \oplus 0 = \overline{B}C$$
$$R = BC \oplus A\overline{C} = BC \oplus 0 \cdot \overline{C} = BC \oplus 0 = BC$$

W takim wypadku mamy już pełną możliwość szybkiej realizacji przykładowej funkcji na dwóch bramkach NFT. Używając wyjścia R z pierwszej bramki do wykonania iloczynu AB, a następnie korzystając z wyjścia Q drugiej bramki do odebrania wyniku, sprawnie osiągamy cel w dwóch krokach (jak wyraźnie widać na rysunku 4).



Rys. 4. Realizacja logiczna układu na bramkach NFT

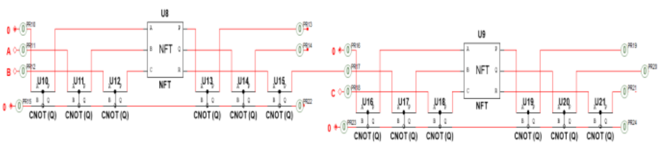
Trudno też przeoczyć obecność aż czterech wyjść, których wartości nie wykorzystujemy do obliczeń – P i Q z pierwszej, oraz P i R z drugiej bramki marnują się. Nie tworząc układów bezpiecznych można byłoby je zupełnie pominąć.

3.Przykładowy układ sterowania

Przez dokonanie odpowiedniego wyboru bramki, przygotowany układ odwracalny zachowuje parzystość (wszystkie jego elementy zachowują parzystość). Jest zatem gotowy, aby uzupełnić go o dodatkowe bramki, które pozwolą sprawdzać zachowywanie parzystości w czasie rzeczywistym – podczas pracy układu (znane w literaturze jako testowanie „online”).

3.1.Metoda klasyczna (opracowana w literaturze)

Jest to prosta w założeniach metoda, jednak wymaga sporego nadmiaru sprzętowego. Do każdego wejścia i wyjścia będą podłączone bramki kontrolowanej negacji (CNOT), które będą wykonywały operację dla wejść i dla wyjść. Wynik działania przechowywany jest na kolejnej linii sygnałowej, która zaczyna z wartością „0” (Rys. 5). Linia ta jest wykorzystywana do kontroli poprawności działania prezentowanego układu.

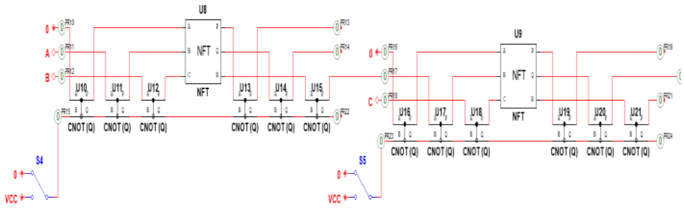


Rys. 5. Klasyczna metoda sprawdzania zachowanej parzystości

Jeżeli po przejściu przez wszystkie dodatkowe bramki sygnał testowy pozostanie zerem, wówczas sprawdzana bramka działa poprawnie. W przeciwnym wypadku, szybko można zidentyfikować wadliwą bramkę i dokonać wymiany jedynie uszkodzonego elementu. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne – jeżeli któraś kontrolowana negacja zawiedzie (np. ostatnia), nawet w przypadku awarii nie będzie szansy szybko namierzyć przyczyny. Jeżeli system ma służyć do kontroli poprawności działania (nie jest potrzebne określenie miejsca wystąpienia uszkodzenia) linie kontrolne można połączyć szeregowo co upraszcza kontrolę poprawności.

3.2.Poprawiona metoda klasyczna (rozwiązanie autorskie)

Znając potencjale zagrożenie, jakim może być, niepoprawnie funkcjonująca bramka w linii testowania, rozszerzono metodę klasyczną poprzez w prowadzenie dynamicznych zmian sygnału na liniach kontrolnych. Wiedząc, że przy zachowanej parzystości wielokrotne wykonanie operacji XOR na linii sygnałowej nie zmieni wartości początkowej na wyjściu układu, zamieniono stałą wartość „0" na sygnał, którego wartość zmienną w czasie (Rys. 6).

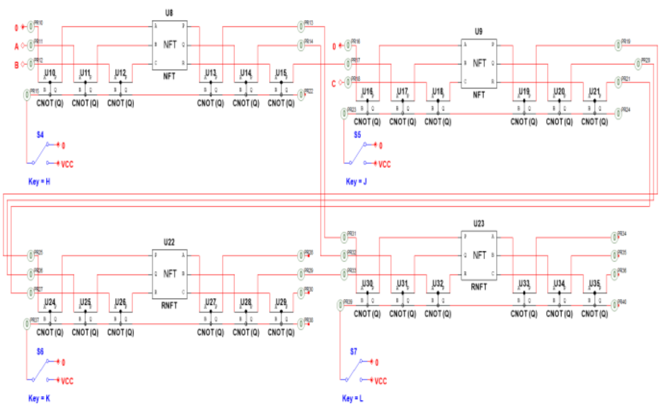


Rys. 6. Poprawiona klasyczna metoda kontroli parzystości

3.3. Jednokanałowe sprawdzanie poprawności działania układu

Jak już wspomniano wcześniej, dla zachowania bezpieczeństwa i niezawodności działania układu sterowania stosuje się zupełnie odmienną technikę. Zwykle sygnały wejściowe trafiają do dwóch niezależnych kanałów przetwarzania (dwóch odrębnych układów realizujących tą samą funkcję). Na wyjściach tych układów jest aktywny komparator, który porównuje ich wyniki. Jeżeli obie wartości są identyczne, wszystko działa w porządku. Kiedy jednak pojawi się różnica, jest to znak, że w którymś z układów wkradł się błąd, lub napotkał awarię. Jest znacznie niższe prawdopodobieństwo, że oba układu ulegną uszkodzeniu w tej samej chwili (do tego w ten sam sposób). Wymagane jest jednak sprawdzenie obu.

W przypadku logiki odwracalnej wiadomo już, że można monitorować poprawność działania każdego elementu z osobna. A dzięki poprawkom wprowadzonym w linii testowej, istnieje możliwość sprawdzenia, czy jej elementy funkcjonują bezbłędnie. Choć przedstawione metody wymagają sporych nakładów sprzętowych, pozwalają znacznie przyspieszyć i usprawnić identyfikację usterki. Mając teraz na uwadze cechy, które wynikają z odwracalności, można w jednym kanale przetwarzania osiągnąć podobny efekt do tego, który obecnie osiągany jest na dwóch. Otóż po stworzeniu układu z elementów zachowujących parzystość (i uzupełnieniu go o testowanie), można szeregowo podłączyć do niego ten sam układ w odwrotną stronę. Rozwiązanie to pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Jednokanałowe testowanie poprawnego funkcjonowania układu

W takiej konfiguracji, mamy dwa razy dokładnie ten sam układ, tylko w lustrzanym odbiciu. Wszystkie wyjścia stają się wejściami – i na odwrót. Korzystając z takiej metody, bezużyteczne wcześniej wyjścia stają się bardzo istotne. Obie części układu – standardowa i lustrzana – zachowują parzystość i stosują te same metody testowania w trakcie działania. Mając takie przygotowanie, można połączyć komparatorami oryginalne wejścia z lustrzanymi wyjściami – kontrolujący tym samym poprawność przeliczania każdej ze zmiennych z osobna. A w przypadku trafienia na błąd, szybko można namierzyć i zidentyfikować jego przyczynę. Takie podejście nie wyklucza dołożenia kolejnego kanału, aby mieć pełną redundancję na wypadek pojawienia się problemu. I nie ma konieczności przerywania działania nawet w trakcie sprawnej eliminacji usterki.

Podsumowanie

Logika odwracalna, która swoimi korzeniami sięga fizyki kwantowej, okazuje się mieć wiele pomocnych zastosowań nawet w świecie algebry dwuwartościowej. Podstawowe elementy, na których się operuje, nie są tak łatwe, przystępne i wygodne, jak ich klasyczne odpowiedniki (o sprawnych metodach syntezy układów nie wspominając). Jednak praca i wysiłek włożone w poznanie nowych narzędzi daje dużo ciekawych korzyści. Znacznie więcej możliwości testowania i wykrywania awarii jest bardzo mile widziane (szczególnie w trakcie działania układu). Choć wyraźnie widać, że mimo lat w sferze koncepcji, nadal nie brakuje miejsca na rozwój i szukanie nawet lepszych rozwiązań. A im szybciej rozwiąże się problemy fizycznej realizacji odwracalnych bramek logicznych, tym sprawniej będzie można korzystać licznych atutów z niej płynących.

Bibliografia:

1. Al Mahamud A., Begum Z., Hafiz M. Z., Islam S., Rahman M. M.: "Synthesis of Fault Tolerant Reversible Logic Circuits". Proceedings of IEEE International Conference on Testing and Diagnosis, Chengdu, China, 2009, s. 1-4.
2. Dobrzański M., Pniewski R.: Obwody logiki odwracalnej odporne na błędy, TTS Technika Transportu Szynowego 12/2016
3. Haghparast M., Navi K.: "A novel fault tolerant reversible gate for nanotechnology based systems", American Journal of Applied Science, vol. 5, no. 5, 2008, s. 519-523
4. Hayes J. P., Markov I. L., Patel K. N.: "Fault Testing for Reversible Circuits". Proceedings of IEEE VLSI Test Symposium, Napa, CA, 2003, s. 410-416
5. Landauer R.: "Irreversibility and heat generation in the computational process". IBM Journal of Research and Development, Vol. 5, Issue 3, 1961, s. 183-191
6. Parhami B.: "Fault-Tolerant Reversible Circuits". Proceedings of 40th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 2006, s. 1722-1726
7. Pniewski R.: Modelowanie logiki rewersyjnej w języku VHDL, Logistyka 3/2015
8. Pniewski R.: Wielomiany Reeda Müllera w syntezie logiki rewersyjnej, TTS Technika Transportu Szynowego 12/2017
9. Pniewski R., Bojarczak P., Kornaszewski M.: Application of Reversible Logic in Synthesis of Traffic Control Systems, TST 2017: Smart Solutions in Today's Transport pp 447-460

Safety of single-channel control systems implemented in reversible logic

The article discusses the method of controlling the correct operation of a control system using reversible gates developed by the authors. Reversible logic allows you to build fault-tolerant digital systems. The authors proposed an improved control method with a dynamic change of control signals, which can significantly improve safety

Keywords: safety, reversible logic, reliability.

Autorzy:

dr hab. inż. **Roman Pniewski** prof.nadz. – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, r.pniewski@uthrad.pl.

mgr inż. **Michał Dobrzński** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im.Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki