

Porównanie wybranych narzędzi do komputerowej analizy układów cyfrowych

Streszczenie. W pracy przedstawiono dwa wybrane narzędzia do symulacji układów cyfrowych: PSpice A/D oraz Electronics Workbench. Wskazano możliwości obu środowisk symulacyjnych do komputerowej analizy układów cyfrowych. Przedstawiono zalety i wady rozważanych narzędzi. Rozważania teoretyczne zilustrowano wynikami obliczeń wybranego układu kombinacyjnego. Przedyskutowano uzyskane wyniki analiz w formie prezentacji tych wyników w obu środowiskach symulacyjnych oraz przydatność tych środowisk w dydaktyce.

Abstract. In the paper two selected tools dedicated to the computer simulation of digital circuits: PSpice A/D and Electronics Workbench are presented. Possibilities of both simulation softwares to the computer analysis of digital circuits are shown. Advantages and disadvantages of considered tools are described. Theoretical considerations are illustrated with performance of calculations of the selected combinatorial system. Obtained results of analyses and the form of the presentation of these results in both simulatory softwares are shown and usefulness of these softwares in the didactics are discussed. (**Comparison of selected tools for computer analysis of digital circuits**).

Słowa kluczowe: układy cyfrowe, symulacje komputerowe, oprogramowanie.

Keywords: digital electronics, computer simulation, software.

Wprowadzenie

Proces projektowania układów elektronicznych obejmuje m.in. analizę pracy zaprojektowanego układu przy zadanych warunkach. Od około 50 lat w realizacji takiej analizy inżynier jest wspierany przez programy komputerowe. Początkowo, programy takie były dedykowane do analizy układów analogowych, jednak już w latach 80-tych ubiegłego wieku zaczęto wykorzystywać takie programy do analizy układów cyfrowych [1, 2, 3]. Programy te są również wykorzystywane podczas kształcenia inżynierów.

Jednym z popularnych programów do analizy układów elektronicznych jest program SPICE opracowany na Uniwersytecie Berkeley [3], a obecnie dostępny w wersjach dedykowanych dla różnych klas komputerów i dla różnych systemów operacyjnych przez wielu producentów oprogramowania, np. PSpice A/D będący częścią pakietu OrCAD. Wadą tego programu jest wysoka cena pakietu komercyjnego oraz ograniczenie wielkości analizowanego układu w wersji demonstracyjnej – dostępnej bezpłatnie.

Na rynku dostępnych jest obecnie wiele bezpłatnych pakietów oprogramowania umożliwiających przeprowadzenie analiz komputerowych układów analogowych lub cyfrowych. Do grupy tej należą m.in. pakiety MultiSim oraz Electronics Workbench [4, 5].

O użyteczności oprogramowania do analizy układów elektronicznych decydują głównie dwa czynniki: dokładność zastosowanych modeli elementów dostępnych w rozważanym programie oraz czas potrzebny na wykonanie niezbędnych obliczeń. Oczywiście, wymagania wysokiej dokładności obliczeń i krótkiego czasu ich trwania są wzajemnie sprzeczne. Dlatego programy wykorzystujące modele elementów elektronicznych o różnej dokładności są przydatne na różnych etapach przygotowywania projektu urządzeń elektronicznych.

W niniejszej pracy porównano wybrane cechy popularnych programów do analizy układów elektronicznych pod kątem ich zastosowań do analizy układów cyfrowych. W szczególności zwrócono uwagę na możliwości zastosowania rozważanych programów w procesie kształcenia studentów.

Charakterystyka pakietu PSpice A/D

Program PSpice A/D jest częścią pakietu OrCAD służącą do wykonywania komputerowej analizy układów

elektronicznych, w szczególności zrealizowanych jako układy scalone [1, 2, 6]. Program ten jest stosowany w elektronice od ponad 40 lat [3] i umożliwia analizę układów analogowych, cyfrowych i analogowo-cyfrowych. Bogate biblioteki tego programu zawierają modele dyskretnych elementów półprzewodnikowych, elementów biernych oraz układów scalonych.

Modele układów cyfrowych opisują zarówno funkcję realizowaną przez te układy, jak i ich nieidealności. Opóźnienia czasowe w propagacji sygnałów przez rozważane układy charakteryzuje model czasowy (timing model), a właściwości elektryczne wejścia i wyjścia rozważanych układów opisują modele wejścia/wyjścia (I/O model) [6]. Dostępne modele wejścia/wyjścia cechują się różną dokładnością odwzorowania rzeczywistych charakterystyk wejściowych i wyjściowych rozważanej klasy układów. Z kolei, model czasowy zawiera informacje na temat wartości czasów propagacji sygnałów przez rozważane układy.

Program PSpice A/D umożliwia przeprowadzenie wielu rodzajów analiz, np. analizy stałoprądowej, analizy częstotliwościowej, analizy stanów przejściowych, analizy parametrycznej, wrażliwościowej, fourierowskiej, temperaturowej oraz analizy Monte Carlo. W przypadku analizy układów cyfrowych uzyskuje się informacje o stanach logicznych (0 lub 1) w poszczególnych węzłach układu (analiza stałoprądowa) lub o czasowych przebiegach stanów logicznych w tych węzłach. W czasowych przebiegach tych stanów uwzględniane są czasy propagacji poszczególnych komponentów układów cyfrowych. Również możliwa jest analiza układów o wyjściach trójstanowych. Podstawowym sposobem wprowadzania opisu analizowanego układu jest jego opis tekstowy, jednak od ponad dwudziestu lat program PSpice wyposażony jest w edytor graficzny umożliwiający wprowadzenie schematu analizowanego układu. Edytor graficzny dokonuje konwersji opisu układu na postać tekstową.

W przypadku analizy układów zawierających jednocześnie układy cyfrowe oraz pod-obwody analogowe w miejscach połączenia tych komponentów umieszczone są odpowiednie obwody wejścia/wyjścia, w których dokonywana jest konwersja stanów logicznych na odpowiednie napięcia. Obwody te modelują charakterystyki podstawowych cyfrowych bloków funkcjonalnych – bramek.

W szczególności możliwe jest uwzględnienie wpływu prądu obciążenia na napięcie wyjściowe, a w tym przypadek uzyskania napięcia nieodpowiadającego żadnemu ze stanów logicznych.

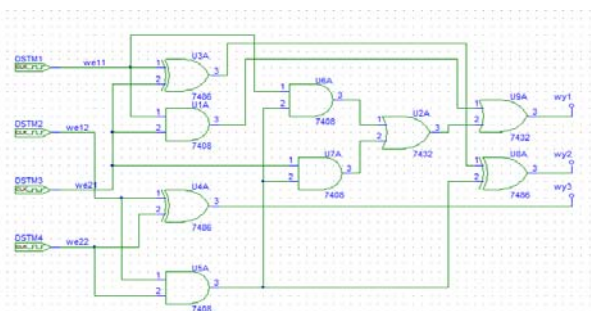
Charakterystyka pakietu Electronics Workbench

Pakiet oprogramowania Electronics Workbench (EWB) służy do analizy i projektowania układów cyfrowych, analogowych i analogowo-cyfrowych. Został on opracowany przez firmę Interactive Image Technologies (obecnie National Instruments Electronics Workbench Group) [5]. W tej pracy uwagę skupiono głównie na zastosowaniu tego pakietu do analizy układów cyfrowych.

Podobnie jak w programie PSPICE A/D, układ wprowadza się do programu poprzez rysowanie jego schematu w interfejsie graficznym z elementów, które są dostępne w bibliotekach. W bibliotekach tego programu znajdują się elementy analogowe oraz cyfrowe bloki funkcjonalne i cyfrowe układy scalone. Do dyspozycji użytkownika są m.in. podstawowe układy kombinacyjne, takie jak sumatory, komparatory, multiplexery, demultiplexery, bramki logiczne, układy scalone CMOS i TTL, idealne modele przerzutników D, JK, RS (można wybrać przerzutniki w pełni synchroniczne lub z asynchronicznymi wejściami SET i RESET), diody półprzewodnikowe, rezystory, wyświetlacze siedmiosegmentowe, linie transmisyjne, tranzystory, mnożniki, dzielniki.

Program EWB umożliwia analizę stanów przejściowych badanych układów, wyznaczenie punktu pracy, analizę stałoprądową, analizę częstotliwościową, analizę fourierowską, analizę Monte Carlo. Podobnie jak w programie PSPICE A/D, użytkownik może ustawić szereg opcji analizy ułatwiających uzyskanie zbieżności obliczeń.

Podczas analizy stanów przejściowych użytkownik może zadać warunki początkowe analizy, czas, do którego będzie ona przeprowadzona i węzły układu, w których mają zostać przedstawione przebiegi napięć. Parametry analizy zadaje się podobnie, jak w programie PSPICE A/D.

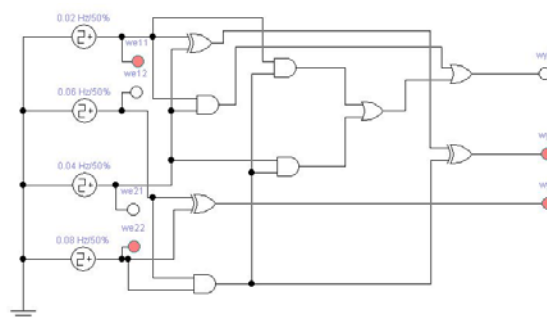


Rys.1. Schemat sumatora dwóch liczb dwubitowych w programie PSPICE A/D

Badany układ

Wykorzystując programy PSPICE A/D w wersji 9.2 oraz Electronics Workbench w wersji 5.12 przeprowadzono analizy wybranych układów cyfrowych. Aby pokazać

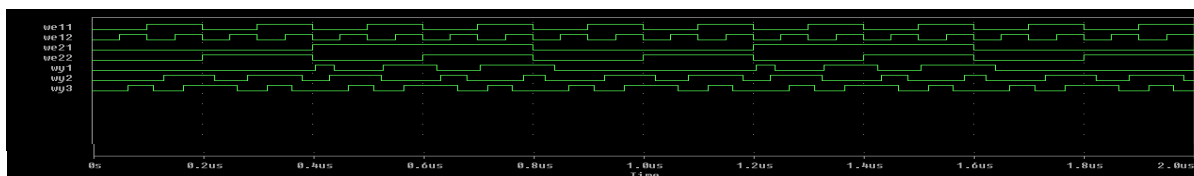
podobieństwa i różnice między rozważanymi programami rozważono najpierw prosty układ kombinacyjny realizujący funkcję sumatora dwóch liczb dwubitowych. Schematy sumatora narysowane w edytorze graficznym programu PSPICE A/D pokazano na rys.1, a narysowane w programie Electronics Workbench - na rys. 2.



Rys.2. Schemat sumatora dwóch liczb dwubitowych w programie EWB

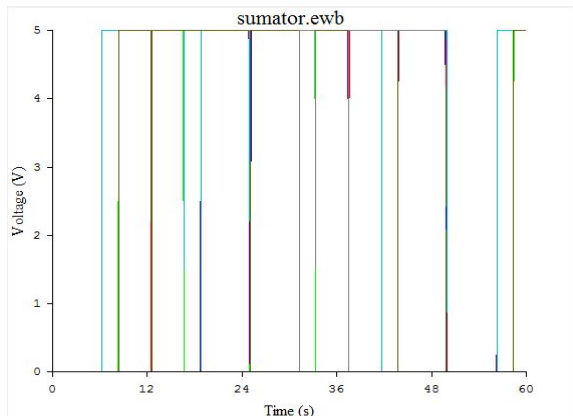
W układzie sumatora zastosowano bramki realizujące odpowiednie funkcje logiczne, tzn. AND, OR, XOR oraz źródła sygnałów wejściowych wytwarzające ciągi impulsów prostokątnych o współczynniku wypełnienia równym 0,5 i różnych wartościach częstotliwości.

W programie PSPICE A/D możliwa jest analiza układów, dla których wskazano konkretne typy elementów składowych. W bibliotekach tego programu, z każdym typem cyfrowego układu scalonego związana jest realizowana przez ten układ funkcja cyfrowa oraz parametry czasowe i parametry obwodu wejścia/wyjścia. Wyniki obliczeń można obserwować w postaci informacji o stanach logicznych w poszczególnych węzłach układu w stanie ustalonym lub w chwili $t = 0$ dla analizy stanów przejściowych (wyświetlanych na schemacie w postaci cyfr 0 lub 1) lub w postaci czasowych przebiegów napięć w rozważanym układzie. Mają one formę przebiegów trapezoidalnych o poziomach odpowiadających stanowi 0, 1 lub Z dla węzłów połączonych tylko z wyprowadzeniami innych układów cyfrowych lub w postaci czasowych przebiegów napięć w węzłach, do których podłączony jest co najmniej 1 element inny niż układ cyfrowy lub prądów płynących przez takie elementy. Dla prezentowanych sygnałów cyfrowych stosuje się wspólną oś czasu i osobne osie wartości funkcji (przebiegi umieszczone są na ekranie jeden pod drugim) a każdy przebieg jest opisany stosowną etykietą, dzięki czemu obraz przebiegów jest bardziej czytelny dla użytkownika. Przykładowe przebiegi czasowe w układzie sumatora z rys.1 pokazano na rys.3. Jak widać, uzyskane przebiegi napięć dobrze ilustrują opóźnienia między sygnałami spowodowane przez niezerowe czasy propagacji zastosowanych bramek. Oczywiście, opóźnienia te mają znaczenie tylko wtedy, gdy na wejście układu podawane są sygnały o wysokiej częstotliwości.



Rys.3. Czasowe przebiegi stanów cyfrowych w wybranych węzłach układu sumatora z rys.1 uzyskane za pomocą programu PSPICE A/D

Z kolei, w programie EWB wartości częstotliwości sygnałów wejściowych dobrano w taki sposób, aby możliwe było bezpośrednie obserwowanie w czasie rzeczywistym efektów działania rozważanego układu na wskaźnikach diodowych dołączonych do każdego wejścia (we11, we12, we21 i we22) i wyjścia układu (wy1, wy2 oraz wy3). Zmiany barwy świecenia tych wskaźników są widoczne na schemacie w trakcie trwania obliczeń i pozwalają na szybką wizualną weryfikację poprawności działania badanego układu. Można tę funkcję wykorzystać m.in. przy tworzeniu wirtualnego laboratorium techniki cyfrowej.

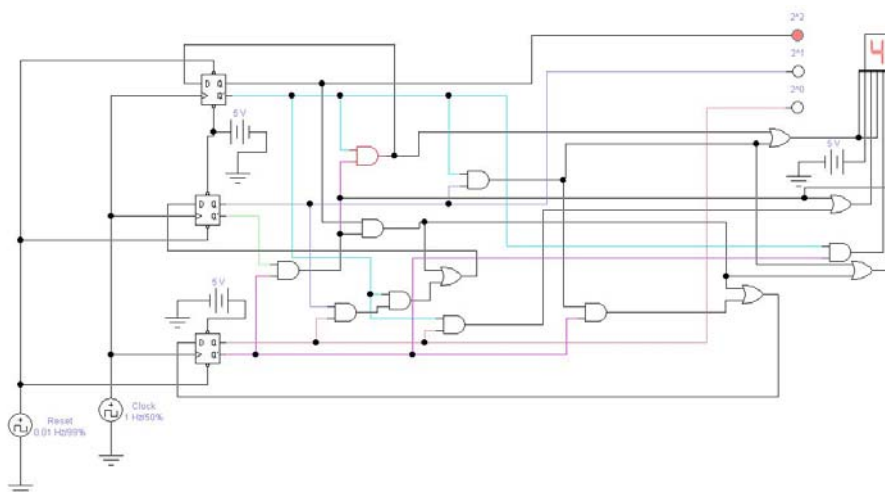


Rys.4. Czasowe przebiegi napięć w wybranych węzłach układu sumatora z rys. 2 uzyskane za pomocą programu EWB

Zastosowane w programie EWB modele bramek uwzględniają funkcję realizowaną przez każdą z tych bramek, lecz nie uwzględniają czasu propagacji zastosowanych bramek ani wpływu obciążenia na wartości napięć obserwowanych w poszczególnych węzłach rozważanego układu. Program ten umożliwia także

obserwację czasowych przebiegów napięć w wybranych węzłach analizowanego układu, ale forma prezentacji tych przebiegów jest wysoce niedoskonała. Na rys. 4 przedstawiono czasowe przebiegi napięć na wejściach i wyjściach rozważanego sumatora uzyskane za pomocą programu EWB. Prezentowane przebiegi mają kształt ciągu impulsów prostokątnych o poziomach równych odpowiednio 0 oraz 5V umieszczonych we wspólnym układzie współrzędnych. Widoczne są jedynie uzależnienia czasowe między sygnałami występującymi w obwodzie, ale nie można uwzględnić czasów narastania, opadania ani opóźnienia sygnałów. Widać też, że wykresy te są dla użytkownika zupełnie nieczytelne, pomimo tego, że każdy z nich oznaczony jest innym kolorem. Nie widać na wykresie, który kolor oznacza przebiegi napięć w poszczególnych węzłach. Dodatkowo, nie jest możliwe przeprowadzenie analizy stanów przejściowych przez czas krótszy od 100 ns, a minimalny krok obliczeń wynosi 12,5 ns. Oznacza to w praktyce, że nie jest możliwe uwzględnienie w obliczeniach wpływu opóźnień propagacyjnych, które odpowiadają pojedynczym nanosekundom.

Jak wspomniano wyżej, w zastosowaniach dydaktycznych istotne znaczenie może mieć możliwość dołączenia do wybranych zacisków analizowanego układu wskaźników diodowych lub wskaźników siedmiosegmentowych, których działanie jest widoczne na schemacie w trakcie trwania obliczeń i pozwala na szybką weryfikację poprawności działania badanego układu. Funkcję taką można zrealizować w programie EWB, natomiast nie jest to możliwe w programie PSPICE A/D. Przykładowo, na rys. 5 pokazano schemat licznika synchronicznego przygotowany w programie EWB. W układzie tym stan licznika jest prezentowany jednocześnie za pomocą diod LED oraz wskaźnika siedmiosegmentowego. Oczywiście stan licznika może być prezentowany na schemacie w czasie rzeczywistym.



Rys.5. Schemat licznika synchronicznego w programie EWB

Podsumowanie

W pracy scharakteryzowano właściwości dwóch popularnych środowisk do komputerowej analizy układów cyfrowych EWB oraz PSPICE A/D. Z przedstawionego porównania obu wymienionych środowisk wynika, że dobrze nadają się one do zastosowania w dydaktyce. Bardzo ważną zaletą środowiska EWB jest możliwość szybkiego przygotowania projektu układu cyfrowego przy zastosowaniu idealnych modeli układów cyfrowych i łatwa analiza uzyskanych wyników obliczeń prezentowanych

wprost na schemacie za pomocą wskaźników diodowych lub wyświetlaczy. Można stwierdzić, że program ten może pełnić rolę wirtualnego laboratorium techniki cyfrowej. Wadą tego programu jest niewygodny w użytkowaniu postprocesor graficzny oraz idealizacja właściwości układów cyfrowych.

Z kolei, program PSPICE A/D wykorzystuje modele konkretnych układów scalonych i dzięki temu pozwala wykrywać stany niepożądane w pracy układów cyfrowych spowodowane nie tylko niepoprawnym projektem na

poziomie logicznym, ale także uwzględnia właściwości elektryczne zastosowanych elementów i układów scalonych. Sposób prezentacji wyników pozwala na przeanalizowanie wpływu na pracę analizowanych układów opóźnień występujących w analizowanym układzie oraz prądów pobieranych przez wejścia poszczególnych układów scalonych oraz elementy analogowe połączone z wyjściami układów cyfrowych.

Z punktu widzenia dydaktyki oba prezentowane środowiska symulacyjne mają szereg zalet wymienionych powyżej, które predestynują je do wykorzystania w procesie nauczania zagadnień dotyczących techniki cyfrowej. Na początkowych semestrach studiów wystarczające jest stosowanie środowiska EWB, które łatwo pozwala zilustrować właściwości prostych układów cyfrowych przy pominięciu efektów drugorzędnych i przedstawić wyniki działania układu w postaci podobnej, jak w rzeczywistym układzie. Z kolei, projektowanie fizycznego układu z elementami cyfrowymi wygodnie jest zrealizować w środowisku PSPICE A/D dla studentów wyższych semestrów, którzy już zapoznali się z właściwościami elementów półprzewodnikowych oraz układów elektronicznych. Dodatkowo można uwzględnić w programie PSPICE A/D zjawiska drugorzędne, np. zjawiska cieplne w sposób opisany w pracy [7].

Czasy trwania obliczeń rozważanych układów za pomocą obu programów typowo są zbliżone do siebie i wynoszą od paru setnych sekundy do kilkunastu sekund. W przypadku programu EWB i niskich częstotliwości sygnałów wejściowych czas trwania obliczeń odpowiada zadanemu czasowemu zakresowi analizy, a wyniki obliczeń w czasie rzeczywistym mogą być prezentowane na wskaźnikach umieszczonych na schemacie.

Przedstawione w pracy wyniki analizy prostego układu

sumatora stanowią jedynie przykład ilustrujący możliwości obu programów. Można oczywiście wykorzystać każdy z nich do analizy bardziej złożonych układów cyfrowych, np. układów synchronicznych lub asynchronicznych. Celowe jest połącznie w laboratorium techniki cyfrowej ćwiczeń realizowanych wirtualnie, np. przy wykorzystaniu jednego z przedstawionych programów, oraz realizowanych przy wykorzystaniu układów rzeczywistych.

Autorzy: Małgorzata Górecka, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa; prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia.

LITERATURA

- [1] B.M. Wilamowski, R.C. Jaeger, Computerized circuit Analysis Using SPICE Programs, *McGraw-Hill*, New York, (1997)
- [2] J. Porębski, P. Korohoda, SPICE program analizy nieliniowej układów elektronicznych, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, (1996)
- [3] A. Vladimirescu, Shaping the History of SPICE, *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, (2011), Vol. 3, No. 2, 36-39
- [4] K. M. Noga, M. Radwański, Multisim. Technika cyfrowa w przykładach, Wydawnictwo BTC, Legionowo, (2009)
- [5] Electronics Workbench Circuit Board Design and Simulation Software, *National Instruments*. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pl/nid/202311>
- [6] K. Górecki, Zastosowanie programu SPICE do modelowania elementów i układów elektronicznych, Wydawnictwo Tekst, Bydgoszcz, 2010
- [7] K. Górecki, J. Zarębski, J. Krupa, Modelowanie układów analogowo-cyfrowych w programie SPICE przy uwzględnieniu samonagrzewania, *Elektronika*, Nr 2, (2009), 59-63