Systemy wbudowane i czasu rzeczywistego

Referat na temat: Zastosowanie algorytmów genetycznych w systemach czasu rzeczywistego

Adam Kasperowicz 279046

Spis Treści

[1. Wprowadzenie 2](#_Toc507247391)

[a. Cel referatu 2](#_Toc507247392)

[b. Systemy czasu rzeczywistego 2](#_Toc507247393)

[c. Algorytmy genetyczne 2](#_Toc507247394)

[2. Rozmieszczanie elementów elektronicznych w układach VLSI 3](#_Toc507247395)

[a. Problem 3](#_Toc507247396)

[b. Algorytm genetyczny 4](#_Toc507247397)

[3. Optymalizacja planów produkcji energii w systemie elektroenergetycznym 5](#_Toc507247398)

[a. Problem 5](#_Toc507247399)

[b. Kodowanie i funkcja celu 5](#_Toc507247400)

[c. Algorytm Genetyczny 6](#_Toc507247401)

[d. Modyfikacje 7](#_Toc507247402)

[4. Poszukiwanie szeregowalnych zbiorów wystąpień zadań cyklicznych 7](#_Toc507247403)

[a. Problem 7](#_Toc507247404)

[b. Kodowanie i funkcja celu 8](#_Toc507247405)

[c. Algorytm Genetyczny 8](#_Toc507247406)

[d. Wnioski 9](#_Toc507247407)

[5. Projektowanie rozproszonych systemów komputerów nieprzekraczalnego czasu krytycznego 9](#_Toc507247408)

[a. Problem 9](#_Toc507247409)

[b. Kodowanie i funkcja celu 10](#_Toc507247410)

[c. Algorytm Genetyczny 10](#_Toc507247411)

[6. Podsumowanie 11](#_Toc507247412)

[7. Bibliografia 12](#_Toc507247413)

# Wprowadzenie

## Cel referatu

Praca ma za zadanie wyróżnienie i opisanie różnych zastosowań jakie technika algorytmów genetycznych znajduje w systemach czasu rzeczywistego. Na początku zdefiniowane zostaną pojęcia systemu czasu rzeczywistego i algorytmu genetycznego. Następnie wymienione zostaną po kolei rzeczywiste przykłady, w których obie technologie ze sobą współpracują. Referat zostaje zakończony podsumowaniem oraz wnioskami jakie można było wynieść z przedstawionych przykładów.

## Systemy czasu rzeczywistego

Za definicję tego pojęcia uznajemy „[…] system komputerowy w którym obliczenia, przeprowadzone równolegle z przebiegiem zewnętrznego procesu, mają na celu nadzorowanie, sterowanie lub terminowe reagowanie na zachodzące w procesie zdarzenia.” (IEEE, 1990) z ang. (Sacha, 2006). Esencją tej technologii jest reagowanie na zdarzenia zewnętrzne bez przekraczania ściśle określonego czasu.

Systemy te znajdują szerokie i integralne zastosowanie w branżach m. in.:

* Komercyjnych i biurowych (np. banki, komunikacja miejska i globalna) – W tym obszarze szczególnej uwadze podlega parametr czasu reakcji systemu. Obrazują to szczególnie historie o milisekundowych opóźnieniach w transakcjach giełdowych które powodowały milionowe straty dla uczestników transakcji.
* Systemy sterowania przemysłowego i systemy dowodzenia (np. taśma produkcyjna samochodów, system rakiet balistycznych dalekiego zasięgu) – Te dziedziny są skłonne poświęcić czas reakcji dla niezawodności systemu i wytrzymałości na sytuacje kryzysowe. Nietrudno sobie wyobrazić, że dla systemu obrony narodowej najważniejszym parametrem jest to czy będzie on nadal działał pomimo pierwszego uderzenia przeciwnika.

## Algorytmy genetyczne

Definiowane jako „[…] algorytmy poszukiwania oparte na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczności.” (Goldberg, 1995). Główną ideą stojącą za algorytmem jest próba naśladowania ewolucji, zaś jej działanie można streścić następującymi ogólnymi krokami.

1. Utwórz populację składającą się z losowych przedstawicieli możliwych rozwiązań problemu
2. Dokonaj selekcji – Wyznacz przystosowanie każdego osobnika a następnie zwiększ procentowy udział lepiej przystosowanych osobników w całej populacji i odpowiednio zmniejsz udział gorzej przystosowanych.
3. Dokonaj krzyżowania – Z losowo wybranych par w populacji(rodzice) utwórz nowe osobniki(dzieci) poprzez zmieszanie cech rodziców, a następnie zastąp rodziców dziećmi.
4. Dokonaj mutacji – Dla losowo wybranych osobników zmień w sposób przypadkowy jedną z cech.
5. Jeśli nie został osiągnięty został warunek stopu to przejdź do kroku 2.

Technologia ta należy do szerokiej grupy metod optymalizacyjnych. Dokładniej, jest ona bardziej inteligentnym przedstawicielem metod losowych. Cechą odróżniającą algorytmy genetyczne od metod analitycznych i enumeratywnych jest większa odporność. Oznacza to, że naśladowanie procesów ewolucyjnych pozwala nam lepiej rozwiązywać problemy, w których istnieje znaczna ilość minimów lokalnych.

# Rozmieszczanie elementów elektronicznych w układach VLSI

Zastosowanie opisane przez Macieja Górskiego i opublikowane w (Mazur i Huzar, 2008)

## Problem

Konstrukcja układów wysokiej skali integracji (ang. VLSI) jest obiektem badań wielu badaczy od kiedy elementy tych układów osiągnęły mikroskopijne rozmiary. Astronomiczne ilości podzespołów oraz rosnąca złożoność montażu układów stały się przyczynkiem ogólnego problemu rozmieszczenia owych elementów na układzie. Pośród wielu metod pomagających w zoptymalizowaniu rozmieszczenia zastosowanie znalazły algorytmy genetyczne.

By rozwiązać problem optymalizacyjny należy jednak najpierw rozwiązać problem reprezentacji rozłożenia elementów układu i zakodowania tego układu. Wyróżnia się dwie kategorie reprezentacji:

* Struktura plastrowa (ang. slicing structure) – Za reprezentacje odpowiada drzewo binarne, którego liście oznaczają moduły, zaś węzły wewnętrzne określają linię pionowego lub poziomego cięcia gilotynowego. Do zapisania ów drzewa wykorzystuje się znormalizowaną notację polską.
* Struktura nieplastrowa (ang. non slicing structure) – Tutaj do wyboru mamy wiele możliwości są to m.in.: sekwencje par (ang. sequence pair), sieć ograniczonych linii podziałów (ang. bounded slice line grid), O-drzewo (ang. 0-tree). Wszystkie metody reprezentacji wraz z odpowiadającymi publikacjami są dostępne w artykule źródłowym.

## Algorytm genetyczny

W opisywanym artykule do reprezentacji wykorzystana została odwrotna notacja polska. Następnie podana została specyfikacja wykorzystanego algorytmu genetycznego.

Za funkcje celu przyjęto , gdzie A to pole prostokąta ograniczającego wszystkie bloki układu, W to całkowita długość połączeń między poszczególnymi połączeniami, zaś to parametr określający znaczenie współczynnika W ().

Populacja początkowa nie mogła zostać wyznaczana poprzez zwykłe losowanie z racji na niemożność użycia notacji polskiej do tego typu działań. Zamiast tego, przez autora, jeden osobnik stworzony został arbitralnie. Następnie, poprzez użycie modyfikacji zachowujących poprawność notacji stworzona została cała populacja innych osobników. Modyfikacje oraz ich wyprowadzenie dostępne są w pracy opisywanego autora.

Selekcja następowała poprzez metodę prostej ruletki.

Do krzyżowania wykorzystane zostały 3 różne metody. Jedną z nich jest metoda PMX następnymi dwoma są modyfikacje krzyżowania prostego które działają poprawnie dla odwrotnej notacji polskiej.

Mutacja zostaje zaimplementowana na 5 sposobów. Jednym z nich jest inwersja chromosomu, zaś pozostałe 4 to znowu modyfikacje przystosowane do odwrotnej notacji polskiej.

Ostatnim zabiegiem jest wykorzystanie mechanizmu sterowania dynamiką zmian zbiorowości. Działa on następująco, jeśli wariancja obecnej populacji jest mniejsza od wariancji populacji początkowej to zwiększane jest prawdopodobieństwo mutacji. Jeśli wariancja przekracza pełną granicę to prawdopodobieństwo jest odpowiednio zmniejszane.

# Optymalizacja planów produkcji energii w systemie elektroenergetycznym

Zastosowanie opisane przez Mirosława Gajera i opublikowane w (Kwiecień i Gaja, 2004)

## Problem

„Charakterystyczną cechą pracy systemu elektroenergetycznego jest nieustanne zmienianie się zapotrzebowania na moc elektryczną zgłaszanego przez odbiorców. Aby zapewnić ciągłość dostaw energii elektrycznej dla odbiorców, elektrownie wchodzące w skład systemu elektroenergetycznego muszą dysponować odpowiednio dużą rezerwą mocy” (Mirosław Gajer). Ten wstęp od autora pracy obrazuje nam jak ważnym problemem jest optymalizacja planów produkcji energii. Historia jest pełna wydarzeń obrazujących nam jak nieoptymalne wykorzystanie mocy produkcyjnych powoduje istne katastrofy. Takimi przykładami są wydarzenia w 2003 roku w Stanach Zjednoczonych, Szwecji czy Włoszech.

Optymalizacja polega dokładnie na takim rozłożeniu produkcji energii w czasie by możliwe było zaspokojenie potrzeb wszystkich odbiorców przy jednoczesnym zminimalizowaniu kosztów produkcji. Oprócz czynników ekonomicznych takich jak maksymalizacja użyteczności i minimalizacja kosztów jest to również część większego problemu jakim jest dbanie o środowisko. Minimalizacja produkcji energii skutkuje minimalizacją zużycia surowców naturalnych jak i zanieczyszczania środowiska.

Pomimo istotności tego problemu nie udało się utworzyć metod analitycznych, które oprócz maksymalizacji funkcji celu pozwalają również na uwzględnienie warunków węzłowych lub uwzględnianie różnych źródeł energii. Z tego powodu skupiono uwagę na metody sztucznej inteligencji. Jedną z nich, którą autor pracy wykorzystuje do rozwiązania problemu optymalizacji są algorytmy genetyczne.

## Kodowanie i funkcja celu

Okazuje się możliwe jest zaimplementowanie prostego algorytmu genetycznego, który nie dość, że znajduje optymalny plan produkcji, pozwala nam na uwzględnienie wielu warunków i modyfikacji dodatkowych.

Stan sieci elektroenergetycznej jest kodowany za pomocą ciągu bitów długiego na N\*(10 + 1) znaków. Gdzie N oznacza ilość elektrowni. Następnie wyliczana jest produkcja energii danej elektrowni ze wzoru.

,

gdzie to minimalna produkcja energii dla działającej elektrowni, to maksymalna produkcja energii, zaś

,

gdzie jest to i-ty bit dla danej elektrowni. Dodatkowy 1 bit służy nam do uwzględnienia wyłączenia elektrowni, a tym samym minimalizacji kosztów do zera. Moc danej elektrowni z uwzględnieniem możliwość wyłączenia wyliczamy za pomocą wzoru , gdzie to właśnie ten dodatkowy 11-sty bit.

Posiadając wytwarzaną moc możemy obliczyć koszt dla danej elektrowni. Jest ona równa.

,

gdzie współczynniki () są stałymi zależnymi on danego bloku energetycznego. Dla kosztów obowiązuje analogiczny wzór do wyliczenia uwzględniającego wyłączenie bloku.

Ostateczna funkcja celu przyjmuje formę

,

gdzie oznacza zapotrzebowanie na energię w całej sieci, zaś jest współczynnikiem proporcjonalności strat przesyłowych poniesionych przez ten blok. Widzimy, że lepiej przystosowane osobniki będą osiągały mniejszą wartość funkcji celu. Czyli, odpowiadająca temu osobnikowi w populacji elektrownia będzie bardziej efektywnie produkowała prąd.

## Algorytm Genetyczny

Wykorzystany tutaj algorytm wykorzystuje proste metody działania.

Pierwotna populacja jest generowana losowo. Nie istnieją przeciw temu żadne wskazania, gdyż do kodowania wykorzystywane jest proste kodowanie binarne.

Osobniki są krzyżowane w sposób prosty. To znaczy, że losowo wybierany jest punkt podziału, który dzieli 2 osobniki na 2 części. Następnie, jeden potomek otrzymuje pierwszą część pierwszego rodzica i drugą część drugiego rodzica, zaś drugi potomek otrzymuje analogicznie odwrotne części rodziców.

Mutacja następuje poprzez proste wylosowanie jednego na tysiąc bitu i logiczne zanegowanie go.

Najbardziej zaawansowana jest faza selekcji. Wykorzystuje ona metodą turniejową. Działa ona następująco:

1. Utwórz nową populację składającą się osobników rodzicielskich i potomnych.
2. Wylosuj parę z populacji i usuń osobnika z populacji o gorszym przystosowaniu.
3. Jeśli rozmiar obecnej populacji jest dwa razy większy od populacji pierwotnej to przejdź do pkt 2.

## Modyfikacje

Autor pracy przedstawia również modyfikacje funkcji celu i/lub kodowania, która pozwala na uwzględnienie różnych członków sieci i warunków działania. Alternatywne wersje algorytmu uwzględniają:

* Optymalizacja produkcji energii jako szereg czasowy o dowolnej podstawie czasowej.
* Uwzględnienie kosztu rozruchu i stopu bloku energetycznego
* Uwzględnienie elektrowni wodnych, szczytowo-pompowych oraz zakupu energii z zewnątrz

Dokładne wyprowadzenie wzorów i objaśnienia dostępne są w pracy autora.

# Poszukiwanie szeregowalnych zbiorów wystąpień zadań cyklicznych

Zastosowanie opisane przez Arkadiusza Jestratjewa i Andrzeja Kwietnia i opublikowane w (Gaja, 2005)

## Problem

Systemy czasu rzeczywistego podlegają podziałowi na niezależne zadania cykliczne o różnych ograniczeniach czasowych. By tego dokonać należy utworzyć szeregowalny zbiór wystąpień zadań ze zbioru zadań cyklicznych otrzymanych poprzez podział programów składających się na dany system. Taki podział systemu pozwala nam zoptymalizować czasu obsługi systemu. To skutkuje możliwością wykorzystania starszych, wolniejszych, ale również tańszych elementów systemu. Koniec końców, optymalizacja pozwala nam na obniżenie kosztów systemu przy jednoczesnym zachowaniu jego parametrów.

Posiadanie szeregowalnego zbioru zadań pozwala nam natychmiast wygenerować szeregowalny zbiór wystąpień zadań i uzyskać korzyści z optymalizacji dzięki wykorzystaniu algorytmu EDF (ang. Earliest Deadline First). Problem pojawia się, gdy nasz zbiór zadań jest nieszeregowalny. Okazuje się utworzenie szeregowalnego zbioru wystąpień zadań w tym przypadku lub stwierdzenie czy taki zbiór w ogóle istnieje jest problemem NP-trudnym.

Autor pracy bada możliwość zastosowania algorytmu genetycznego do rozwiązania tego problemu.

## Kodowanie i funkcja celu

Z racji na specyfikę problemu sposób reprezentacji osobników oraz oceny ich przystosowania zostaje przedstawiony pobieżnie. Uwzględniane zostają tylko sprawy związane wprost z algorytmiką genetyczną. Czytelnik pragnący poznać dokładną implementację kierowany jest do pracy autorskiej.

Proponowane są dwa kodowania. Pierwsze, zwane prostym, koduje osobnika w postaci wektora liczb całkowitych, w którym każdy element odpowiada czasowi rozpoczęcia danego zadania. Drugie, różnicowe, zapisuje każdy element wektora jako różnicę czasu rozpoczęcia obecnego zadania i czasu rozpoczęcia zadania poprzedniego. Kodowanie różnicowe pozwala nam na zachowanie związków między czasami zwolnienia kolejnych zadań nawet po zmianie w wyniku mutacji lub krzyżowania. Wadą drugiego kodowania jest możliwości naruszenia innych warunków poprawności. Oba kodowania muszą zostać poddane algorytmowi naprawy przed wyliczeniem ich przystosowania.

W obu reprezentacjach wykorzystany jest dodatkowo jeden element, który odpowiada za zakodowanie działania algorytmu EDF.

Ewaluacja funkcji celu następuje poprzez zastosowanie algorytmu EDF na danym osobniku. W wyniku dostajemy czas potrzebny na zrealizowanie danego zbioru wystąpień zadań. Mniejsza wartość funkcji celu oznacza większe przystosowanie a tym samym większą optymalizację.

## Algorytm Genetyczny

Autor pracy wykorzystał następujące techniki w swojej implementacji algorytmu genetycznego.

Selekcja korzysta z metody turniejowej. Z populacji losowanych jest q osobników, gdzie q to z góry ustalany parametr, zaś z tego podzbioru najlepszy osobnik kopiowany jest do nowej populacji. Operacje powtarzamy aż nowa populacja będzie się równała rozmiarem starej populacji.

Mutacja następuje na trzy sposoby. Mutacja równomierna polegająca na losowym wybraniu jednego z elementów wektora osobnika i podmianę go przez losowo wybrany inny element z tego wektora, gdzie rozkład prawdopodobieństwa jest równomierny. Mutacja brzegowa bardzo przypominająca mutację równomierną różni się tylko tym, że losowo wybrany element jest podmieniany przez minimalną lub maksymalną wartość występującą w danym wektorze. Mutacja heurystyczna jest ściśle związana z algorytmem EDF. Polega ona na modyfikacji pierwszego elementu wektora, który powoduje przekroczenie ograniczenia czasowego tak by ograniczenie nie było przekraczane.

Krzyżowanie następuje w sposób prosty i jednorodny. Krzyżowanie proste dzieli dwójkę osobników w losowym punkcie i tworzy z nich dwóch potomków będących kombinacją podzielonych rodziców. Krzyżowanie jednorodne dokonuje wyboru z, z góry ustalonym, prawdopodobieństwem p z którego z dwójki rodziców przekopiowany zostanie element do jednego potomka. Drugi potomek otrzymuje element wektora w tej samej pozycji od drugiego rodzica. Losowanie następuje, dopóki nie wypełniony zostanie cały wektor.

## Wnioski

Wyniki eksperymentów dokonanych przez autora pracy pozwalają nam wynieść następujące wnioski.

* Rodzaj wykorzystanego operatora krzyżowania nie ma wpływu na działanie algorytmu.
* Rodzaj kodowania ma lekki wpływa na działanie algorytmu, z lepszymi wynikami osiąganymi przy kodowaniu prostym.
* Algorytmy genetyczne osiągają podobne wyniki co najlepsze algorytmy losowe i heurystyczne, lecz są od nich znacznie mniej efektywne.

# Projektowanie rozproszonych systemów komputerów nieprzekraczalnego czasu krytycznego

Zastosowanie opisane przez Martynę Jerzy i opublikowane w (Jerzy, 2003)

## Problem

Tworzenie rozproszonych systemów komputerowych jest trudnym wielokryterialnym problemem. Przy planowaniu takiej sieci należy uwzględniać co najmniej możliwe topologie sieci, dostępne technologie czy środowisko, w którym system będzie działać. Dodanie warunku nieprzekraczalnego czasu krytycznego narzuca kolejne wymogi na projektantów. Ostatecznie problem można zdefiniować jako pytanie. Jak zaprojektować system by spełniał on wszystkie wymogi a jednocześnie minimalizował koszty.

Martyna Jerzy pośród wielu podejść do tego problemu wyróżnia algorytmy genetyczne jako jedną z możliwości.

## Kodowanie i funkcja celu

Wykorzystane zostaje kodowanie binarne. Dany osobnik opisany jest przez wektor, którego sektory o stałej i z góry ustalonej długości kodują typ procesora, który zostanie zainstalowany w odpowiadającym węźle rozproszonego systemu.

Funkcja celu ma skomplikowaną formę uwzględniającą wszystkie parametry wiążące się z zainstalowaniem danego procesora w danym węźle. Dokładny wzór dostępny jest w pracy Martyny Jerzy. Funkcja przystosowania definiowana jest jako odwrotność funkcji celu.

## Algorytm Genetyczny

Wykorzystana zostaje specyficzna implementacja.

Operacja krzyżowania składa się z następujących kroków:

1. Wylosuj dwa punkty, które wyznaczą sekcję dopasowania.
2. Dla dwóch osobników, wymień ich elementy wektora w sekcji dopasowania.
3. Dla sekcji na lewo i prawo od sekcji dopasowania dokonaj wymiany tylko jeśli liczba jedynek jednego osobnika w danej sekcji równa się liczbie zer drugiego osobnika w tej samej sekcji.

Operacja mutacji wymienia elementy wektora na dwóch losowych pozycjach.

Na miejsce operacji selekcji został zaimplementowany zamiennik. Działa on następująco.

1. Populacja zostaje poddana operacjom krzyżowania i mutacji.
2. Dla każdego osobnika w nowej populacji sprawdź czy średni koszt jest niższy od średniego kosztu odpowiadającego osobnika z poprzedniej populacji.
3. Jeśli tak to zostaw nowego osobnika. W innym wypadku wprowadź na to samo miejsce osobnika ze starej populacji.

W algorytmie sprecyzowana została również warunek stopu. Algorytm zatrzymuje działanie w momencie uzyskania jednorodności populacji. To znaczy, maksymalna wartość funkcji przystosowania jest równa minimalnej wartości w całej populacji. Dodatkowo wymagane jest by dokonanych zostało przynajmniej iteracji algorytmu, gdzie to ilość węzłów w systemie.

# Podsumowanie

Przedstawione w pracy przykłady zastosowań algorytmów genetycznych w systemach czasu rzeczywistego pozwalają uwidocznić wiele z charakterystycznych cech tej techniki rozwiązywania problemów. Możliwe jest dostrzeżenie obszarów tematyki systemów czasu rzeczywistego, w których algorytmy genetyczne są rozwiązaniem jak najbardziej wskazanym i przydatnym, ale także obszarów, w których nie możemy ich uznać za efektywny sposób sprostania wyzwaniu.

Algorytmy genetyczne są zdecydowanie elastyczne w swojej formie i dzięki temu możliwe jest użycie bardzo podobnych programów do rozwiązania szerokiej gammy problemów. Na wymienionych w referacie przykładach widać było, że proces rozwiązywania problemu algorytmem genetycznym można podzielić na dwa kroki.

1. Definicja reprezentacji osobników oraz określenie funkcji celu i przystosowania.
2. Definicja operatorów genetycznych, które pozwolą na osiągnięcie najefektywniejszych wyników.

Zauważyć można, że wiedza dziedzinowa zawiera się dla większości przypadków w kroku pierwszym. Oznacza to, że jeśli dany problem z dziedziny systemów czasu rzeczywistego może zostać przedstawiony w postaci wykorzystywalnej przez algorytm genetyczny oraz możliwe jest określenie funkcji celu i przystosowania to problem powinien móc być rozwiązywalny.

Algorytmy genetyczne dają duże pole do manewrów. Dla niektórych problemów możliwa jest łatwa modyfikacja algorytmu tak by uwzględniał dodatkowe warunki czy czynniki. Co widać szczególnie na przykładzie optymalizacji produkcji energii w sieci elektroenergetycznej. Ważną cechą jest również możliwość zaatakowania problemów NP.-trudnych lub problemów, dla których nie znaleziono jeszcze formuł analitycznych.

Jednakże, wadą często przesądzającą o nieużyteczności algorytmów genetycznych jest ich złożoność obliczeniowa. Próba naśladowania ewolucji jest niestety procesem powolnym. Częsta złożoność funkcji celu, która musi być w każdej iteracji wyliczana dla całej populacji sprawia, że technologia ta musi często ustąpić miejsca algorytmom heurystycznym pod względem efektywności.

# Bibliografia

Gaja, P. (2005). *Systemy czasu rzeczywistego Projektowanie i aplikacje.* Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.

Goldberg, D. E. (1995). *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania.* Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.

IEEE. (1990). *Standard Computer Dictionary.* IEEE Std 610.

Jerzy, M. (2003). *Wybrane problemy projektowania rozproszonych systemów komputerowych nieprzekraczalnego czasu krytycznego.* Kraków: wydawnictwo FALL.

Kwiecień, A. i Gaja, P. (2004). *Współczesne problemy systemów czasu rzeczywistego.* Wydawnictwo Naukowo Techniczne.

Mazur, Z. i Huzar, Z. (2008). *Modele i zastosowania systemów czasu rzeczywistego.* Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Sacha, K. (2006). *Systemy czasu rzeczywistego.* Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej.