

## Spis treści · Contents

### RECENZOWANE ARTYKUŁY NAUKOWE

#### REVIEWED SCIENTIFIC ARTICLES

Mariusz Słabicki, Maciej Nikodem, Bartosz Wojciechowski, Tomasz Surmacz

#### **Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach**

*Wireless Sensor Networks for Environment Monitoring and Threat Alarming* .....3

Iwona Wróbel

#### **Jednoczesne metody znajdowania wartości szczególnych oraz zer wielomianów ortogonalnych**

*On Simultaneous Rootfinding Methods for Singular Values and Orthogonal Polynomials* .....10

Łukasz Jeleń, Adam Krzyżak, Thomas Fevens, Michał Jeleń

#### **Wpływ technik rozpoznawania wzorców na ocenę złośliwości nowotworów piersi**

*Influence of Pattern Recognition Techniques on Breast Cytology Grading*.....16

Karolina Plawgo, Marian Czerwiński

#### **System ekspertowy a dobór kadr w przedsiębiorstwie. Część A: Koncepcja**

*The Expert System vs the Staff Selection. Part A: Concept of the System* .....24

Katarzyna Topolska, Mariusz Topolski, Bartłomiej Błachut, Marcin Haber, Arkadiusz Piekarcz

#### **Zastosowanie fuzji klasyfikatorów rozmytych i genetycznych w zadaniu sterowania sygnalizacją świetlną**

*Application of Mergers and Genetic Fuzzy Classifiers in the Task of Controlling Traffic Lights* .....29

Tomasz Długosz, Radosław Wróbel

#### **Metodyka badań wydajności małych routerów**

*The Research Methodology for Small Routers Efficiency* .....33



## Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach

*Wireless Sensor Networks for Environment Monitoring and Threat Alarming*

Mariusz Słabicki<sup>1</sup>, Maciej Nikodem<sup>1</sup>,  
Bartosz Wojciechowski<sup>1</sup>, Tomasz Surmacz<sup>1</sup>

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje aktualny stan badań realizowanych w ramach projektu badawczego „Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach, zapewniające długi czas działania i dużą niezawodność”. Celem badań jest opracowanie narzędzi wspomagających ocenę parametrów oraz projektowanie takich sieci z uwzględnieniem specyfiki wykorzystywanych urządzeń i zastosowań. Artykuł prezentuje wyniki pomiarów rzeczywistych węzłów sieci i ich wpływ na tworzone modele i symulatory.

**Słowa kluczowe:** bezprzewodowe sieci czujników, modelowanie, pomiary

**Abstract:** This paper reports aims and current status of a research grant „Long time operating and robust wireless sensor networks with application to environment monitoring and threat alarming”. Research focus on simulation and modeling of wireless sensor networks with application to computer aided verification and development of large sensor networks. This article presents results of measurements taken on real-life nodes of such network and how their influence WSN model and simulation.

**Keywords:** wireless sensor networks, modeling, measurements.

### 1. Bezprzewodowe sieci czujników

Bezprzewodowe sieci czujników (ang. *Wireless Sensor Networks – WSN*) to struktury złożone z setek lub tysięcy niewielkich urządzeń elektronicznych. Urządzenia te potrafią realizować proste zadania monitorowania (pomiar i zbieranie informacji o temperaturze, nasłonecznieniu, wilgotności, ciśnieniu, położeniu (GPS), itp.), sterowania (opartego na wspólnym uzgadnianiu decyzji przez grupę węzłów lub podejmowanych przez stację bazową na podstawie pomiarów) i komunikacji (przesyłania informacji o wartościach pomiarów oraz decyzjach sterujących). Architektury sieci bezprzewodowych pozwalają na stworzenie systemów, które mimo ograniczonych możliwości pojedynczego elementu potrafią realizować złożone zadania. Możliwość ta wynika z faktu współpracy węzłów i wykorzystania informacji pochodzących od wielu z nich do wypracowania najlepszej decyzji.

Nie istnieje jednoznaczna definicja czym są sieci WSN, jednak w wielu źródłach pojawiają się opisy tych sieci, które są porównywalne. Przykładowo, w pracy [3] przedstawione zostały następujące cechy tych sieci:

- możliwość samoorganizacji,
- komunikacja rozgłoszeniowa realizowana na małe odległości,
- routing wieloskokowy,

- gęste rozmieszczenie sensorów,
- częste zmiany topologii powodowane awariami lub zanikami sygnału,
- ograniczone zasoby węzłów (energia, moc transmisji, pamięć, moc obliczeniowa).

Sieci WSN znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie dostęp do miejsc, w których rozłożone zostały węzły sieci, jest problematyczny. W literaturze najczęściej mówi się o monitorowaniu środowiska – gdzie dostęp jest utrudniony ze względu na odległość (rozległe obszary rolnicze) lub ze względu na zagrożenie zdrowia (np. w kraterze wulkanu), a także wykorzystaniu w służbie zdrowia (np. monitorowanie stanu pacjentów) lub automatyce domowej. Wspomina się również o zastosowaniach sieci WSN do celów militarnych – monitorowania pola bitwy lub monitorowania czynności życiowych ludzi znajdujących się na danym terenie [7].

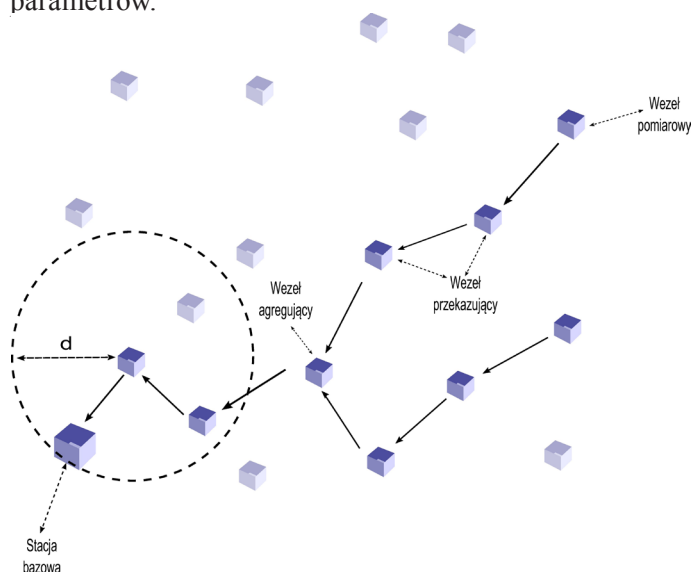
Gros aplikacji sieci WSN wykorzystuje drzewiastą strukturę, w której korzeniem jest węzeł gromadzący wszystkie informacje zbierane przez poszczególne węzły sieci (rys. 1). W literaturze i praktycznych aplikacjach istnieją również rozwiązania, w których używa się więcej węzłów pełniących rolę stacji bazowych, lecz rozwiązania te stanowią zdecydowaną mniejszość. W większości analiz przyjmuje się dodatkowo, że węzeł umieszczony w korzeniu drzewa jest jednocześnie bramą do sieci zewnętrznej.

<sup>1</sup>Institut Informatyki, Automatyki i Robotyki, Politechnika Wroclawska Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław {mariusz.slabicki; maciej.nikodem; bartosz.wojciechowski; tomasz.surmacz}@pwr.wroc.pl

Jest wówczas wyposażony np. w moduł GPRS czy interfejs Ethernet pozwalający komunikować się z użytkownikiem lub systemem zarządzającym. Sieci WSN składają się z homogenicznych węzłów, jednak węzły te są różnicowane funkcjonalnie, a dodatkowo ich funkcje mogą się zmieniać z upływem czasu. Do najważniejszych funkcji, jakie realizują węzły, należą:

- pomiar parametrów środowiska, detekcja zdarzeń,
- routing i zarządzanie strukturą sieci,
- przetwarzanie, agregacja i analiza danych pomiarowych,
- pośredniczenie w komunikacji z innymi systemami i/lub rodzajami sieci.

Pomimo wyróżnienia poszczególnych funkcji, niejednokrotnie kilka z nich jest łączonych w jednym węźle. Zazwyczaj sytuacje takie wynikają ze specyfiki konkretnego zastosowania i są podyktowane dążeniem do maksymalnego uproszczenia reguł działania sieci i poprawienia jej parametrów.



Rysunek 1. Przykładowa sieć WSN

Konstrukcja sieci z wykorzystaniem niewielkich homogenicznych elementów o ograniczonych możliwościach z jednej strony pozwala na stworzenie prostych, niezawodnych i tanich urządzeń, które zasilane bateryjnie będą mogły poprawnie pracować przez wiele tygodni i miesięcy. Z drugiej strony – rodzi szereg zagadnień natury organizacyjnej i aplikacyjnej, które nie występowały w tradycyjnych rozwiązaniach monitorowania czy sterowania.

Jednym z podstawowych ograniczeń występujących w bezprzewodowych sieciach czujników jest niewielki zasięg komunikacji. Typowo zakłada się, że zasięg ten jest wielokrotnie mniejszy od obszaru, na którym sieć WSN została rozmieszczona. Wynika to bezpośrednio z baterijnego zasilania węzłów i dążenia do maksymalizacji czasu ich działania – ponieważ moc potrzebna do komunikacji radiowej rośnie z potęgą odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, to komunikacja na dwukrotnie większą odległość wymaga od 4 do 64 razy wyższych nakładów energetycznych (wartość wykładnika potęgi za-

leży od otoczenia i waha się w przedziale od 2 do 6) [6]. Z tego powodu maksymalny zasięg komunikacji węzłów sieci WSN nie przekracza 400 bądź 100 m.

Drugie ograniczenie stanowi bateryjne zasilanie układów, co do którego dodatkowo zakłada się, że nie jest odnawialne. Założenie to oznacza, że każdy węzeł dysponuje skończoną i niewielką energią, którą musi dysponować umiejętnie i rozważnie, tak aby zapewnić sobie maksymalnie długi czas działania, jednocześnie realizując stawiane mu zadania. Konieczność minimalizacji poboru energii powoduje, że węzły sieci WSN wykorzystują rozwiązania, które mają niskie zapotrzebowanie na moc, a dodatkowo pozwalają na dostosowywanie aktualnie pobieranej mocy do chwilowych warunków i realizowanych zadań. Typowym podejściem w tym zakresie jest wykorzystanie mikrokontrolerów i nadajników radiowych, których chwilowy pobór mocy może być obniżony poprzez wyłączenie niewykorzystywanych układów peryferyjnych (np. przetworników analogowo-cyfrowych, interfejsów komunikacyjnych, timerów). Możliwość dostosowania mocy nadajników radiowych (np. przy komunikacji na małe odległości) pozwala dodatkowo ograniczyć zużycie energii. Kolejnym sposobem na wydłużenie czasu życia sieci jest minimalizacja liczby transmisji radiowych, np. poprzez agregację i odpowiednią organizację struktury komunikacyjnej, czy też usypianie węzłów wtedy, gdy nie muszą realizować żadnych zadań.

Istotnym ograniczeniem są również stosunkowo niewielkie zdolności obliczeniowe i pamięciowe węzłów. Ponieważ elementy sieci wykorzystują proste i uniwersalne układy mikrokontrolerów, to realizacja złożonych algorytmów sterowania czy wykonywanie złożonych operacji arytmetycznych (np. złożonej kompresji, szyfrowania, uwierzytelniania) przez pojedynczy węzeł jest niemożliwa w krótkim czasie i przy jednoczesnym dążeniu do minimalizacji kosztów energetycznych. Podobne ograniczenia dotyczą pamięci, której zasoby są zazwyczaj ograniczone do kilkudziesięciu kilobajtów.

Charakterystyka działania sieci WSN i liczne ograniczenia, którym podlegają, powodują, że najprostsze zadania monitorowania i sterowania wymagają opracowania mechanizmów i procedur dostosowanych do aktualnych warunkowań i bieżącej sytuacji. Z tego powodu w przypadku sieci WSN celowe jest skupienie się na rozwiązaniach adaptacyjnych, które pozwalają węzłom na dostosowanie swojego działania do aktualnie panujących warunków otoczenia i delegowanych zadań. Kluczowym czynnikiem adaptacyjności i realizacji bieżących zadań monitorowania i sterowania jest możliwość skutecznego przesyłania informacji pomiędzy węzłami, a co za tym idzie – dążenie do zagwarantowania poprawności komunikacji radiowej.

## 2. Badania

Celem prowadzonych badań jest opracowanie modelu i symulatora sieci WSN, które będą mogły być wykorzystane do wspomagania procesów projektowania i weryfikacji nu-

merycznej rzeczywistych sieci. Możliwość realizacji tego celu wymaga opracowania dokładnego modelu działania poszczególnych węzłów sieci, który uwzględni możliwie wiele zachodzących zjawisk, parametrów i zależności. Główny nacisk jest kładziony na właściwe odwzorowanie różnych trybów pracy i funkcji realizowanych przez węzły, możliwie dokładne uwzględnienie właściwości radiowego kanału komunikacyjnego oraz maksymalnie szerokiego spektrum funkcji i zadań, do których sieć ma być wykorzystywana. Priorytetem jest poprawa skuteczności komunikacji, zapewnienie niezawodności działania i realizacja stawianych zadań, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwie małych kosztów energetycznych i długiego czasu działania.

Znajomość zasad i reguł działania węzłów oraz ich wpływu na właściwości sieci pozwolą na opracowanie symulatora sieci WSN, w którym możliwe będzie zamodelowanie ich działania. Symulator pozwoli na weryfikację różnych rodzajów bezprzewodowych sieci czujników oraz wpływu takich parametrów, jak liczba węzłów, gęstość rozmieszczenia, homogeniczność, wykorzystywane metody oraz algorytmy organizacji i działania, na parametry tworzonych systemów monitoringu i sterowania. Pozwoli odszukać słabe punkty sieci i wspomóc decyzje projektowe w czasie planowania i uruchamiania sieci WSN.

Realizacja powyższych celów wymaga wykonania szeregu badań mających na celu określenie charakterystyk węzłów działających w różnych warunkach środowiskowych, z różnymi parametrami i w różnych aplikacjach. Badania te przeprowadzamy w oparciu o rzeczywiste węzły bezprzewodowej sieci czujników MicaZ i IRIS. Charakterystyki węzłów i sieci WSN posłużą jako dane wejściowe dla wysokopoziomowych symulatorów, których przeznaczeniem jest szybka i możliwie dokładna symulacja działania sieci. Konieczność stosowania takich symulatorów wynika z dążenia do eksploracji wielu różnych sieci o zróżnicowanych parametrach oraz faktu, że rzeczywiste czasy ich funkcjonowania są liczone w miesiącach, a nawet latach. Tak długi czas działania wyklucza możliwość weryfikacji i porównywania własności rzeczywistych sieci i wymusza stosowanie symulatorów, w których cały cykl życia sieci będzie mógł być zaobserwowany w ciągu co najwyżej kilku/kilkunastu minut. Realizowane badania symulacyjne wykonujemy w środowiskach MATLAB i OMNeT++, które są elastyczne i pozwalają na łatwą rozbudowę funkcji symulatora oraz uwzględnianie interesujących nas parametrów.

Zaletą środowiska MATLAB jest możliwość przeprowadzenia szybkiej i dokładnej symulacji rozległych sieci bezprzewodowych z uwzględnieniem wszystkich czynników wpływających na pracę sieci. Opracowywany przez nas symulator pozwala na efektywne modelowanie działania sieci złożonych z kilkuset węzłów uwzględniając przy tym losowość rozmieszczenia węzłów, zróżnicowanie zasobów i kosztów energetycznych, niedeterministyczny charakter komunikacji, losowość zakłóceń i dużą liczbę innych parametrów, które wpływają na działanie sieci i komplikują model symulacyjny. Opracowany symulator

pozwała na wydajną ocenę efektywności działania sieci, szybki przegląd przestrzeni możliwych rozwiązań projektowych oraz wysoką skalowalność. Dodatkowo wykorzystanie środowiska MATLAB zapewnia dużą elastyczność i konfigurowalność opracowanego rozwiązania.

Drugim z wykorzystywanych rozwiązań jest środowisko OMNeT++ przeznaczone do symulacji różnego rodzaju sieci, w tym sieci kablowych, bezprzewodowych, czy systemów network-on-chip. Jego zaletami są m.in.: wysoka elastyczność i możliwość niemal dowolnej konfiguracji, duża liczba dostępnych bibliotek przygotowana do symulacji konkretnych rodzajów sieci, możliwość uwzględnienia szczegółowych modeli opisujących właściwości wykorzystywanych mediów i protokołów komunikacyjnych, oraz obszerny zbiór topologii sieci, jakie mogą być badane [8]. Niewątpliwą zaletą jest również powszechne uznanie tego symulatora jako miarodajnego systemu pozwalającego na ocenę i porównywanie różnych rozwiązań. W naszych badaniach wykorzystujemy bibliotekę MiXiM [4]. Rozszerza ona możliwość symulatora o możliwość analizy fizycznych parametrów i właściwości bezprzewodowego kanału komunikacji z uwzględnieniem specyfiki propagacji fal radiowych (m.in. interferencji), charakterystyki układów nadawczych i protokołów dostępu do medium komunikacyjnego wykorzystywanego w sieciach WSN. Biblioteka ta została dodatkowo przez nas rozbudowana, aby lepiej odwzorowywać rzeczywiste sieci czujników. Jednym z istotnych elementów, który został opracowany, jest możliwość kontroli mocy nadajników radiowych i dostosowywanie ich do konkretnych wymagań (np. oczekiwanego zasięgu transmisji) oraz warunków propagacji fal radiowych.

Dzięki równoległemu rozwojowi obu symulatorów możliwe jest przeprowadzenie szybkiej weryfikacji działania dużych sieci czujników (z wykorzystaniem środowiska MATLAB) jak i szczegółowa, porównawcza ocena wybranych rozwiązań, w nieco wolniejszym, lecz uwzględniającym szerokie spektrum parametrów, symulatorze OMNeT++. Podejście takie pozwala na eksplorację szeregu różnych rozwiązań dotyczących sieci WSN i porównanie ich z innymi rozwiązaniami proponowanymi w literaturze.

### 3. Rezultaty

W czasie dotychczasowych prac badawczych zbadaliśmy charakterystyki pracy węzłów sieci WSN, określając parametry ich działania, właściwości bezprzewodowego kanału komunikacji i wpływu różnych strategii przesyłania danych na właściwości tworzonych sieci. Do oceny parametrów węzłów wykorzystaliśmy opracowane przez nas oprogramowanie, które pozwalało wprowadzić węzeł w różne tryby pracy, zrealizować komunikację pomiędzy kilkoma węzłami i rejestrować interesujące nas parametry. Opracowana aplikacja pozwoliła na pomiar zasięgów komunikacyjnych, pomiar kosztów energetycznych zarówno związanych z działaniem węzła (realizacją obliczeń, dzia-



łaniem układów peryferyjnych) jak i komunikacji radiowej (nadawania i odbierania danych), pomiar pakietowej stopy błędów i jej zależności od otoczenia i warunków propagacyjnych, jak również określenie modeli propagacyjnych dla sygnału radiowego.

### 3.1. Pomiar zużycia energii

Jednym z celów podejmowanych badań jest dostosowanie mechanizmów sterujących siecią tak, aby jak najlepiej wykorzystać zasoby energetyczne każdego węzła. Dokładny pomiar poboru energii, który przeprowadziliśmy, pozwala na określenie ogólnych strategii, jakie mogą być wykorzystywane przez węzły sieci WSN, aby ten cel osiągnąć. Zmierzone wartości są również wykorzystywane w symulatorach, w których dokładne odwzorowanie dostępnych zasobów energetycznych i ponoszonych kosztów jest niezbędne, aby model programowy pozostawał w zgodzie z rzeczywistością.

Pomiarów zużycia energii dokonaliśmy dla węzłów MicaZ w układzie pomiaru spadku napięcia na rezystorze  $1 \Omega$  podłączonym szeregowo z węzłem do stabilizowanego źródła zasilania. Mierzona wartość spadku napięcia wzmacniona 20-krotnie przez wzmacniacz napięciowy MAX4373 była odczytywana z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego.

#### 3.1.1. Koszty energetyczne transmisji radiowej

Pobór energii związany z realizacją komunikacji zależy od wielu parametrów pracy węzła, lecz mimo to bardzo często [2,5,9] przedstawia się go jedynie w funkcji zasięgu transmisji radiowej. Takie podejście argumentowane jest niskim zapotrzebowaniem na energię w okresach pomiędzy transmisją kolejnych danych. Przeprowadzona weryfikacja powyższego modelu pozwoliła zauważyć, że ten uproszczony model kosztów energetycznych nie znajduje potwierdzenia w zachowaniu rzeczywistych węzłów sieci WSN.

Tabela 1. Pobór prądu podczas transmisji oraz nasłuchiwania i odbioru danych radiowych przez węzeł MicaZ

Nadawanie			
Moc [dBm]	Prąd [mA]	Moc [dBm]	Prąd [mA]
-25	9,7	-15	10,7
-10	11,6	-7	12,5
-5	13,3	-3	13,7
-1	14,3	0	15,4
Nasłuchiwanie i odbiór [mA]			
14,5			

Jednym z kluczowych czynników, który nie jest uwzględniany w tym modelu, są koszty energetyczne związane z nasłuchiowaniem i odbiorem danych przesyłanych kanałem radiowym. Przeprowadzone pomiary rzeczywistych węzłów (tab. 1) pozwoliły zauważyć, że pobór prądu w czasie nasłuchiwania i odbioru danych jest porównywalny z prądem niezbędnym do transmisji danych z mak-

symalną możliwą mocą i niemal o 50% większy niż prąd potrzebny do wysłania z najmniejszą mocą. Oznacza to, że uwzględnienie poboru energii w czasie nasłuchiwania i odbioru danych jest istotne i nie może być pomijane. Wpływ kosztu energetycznego nasłuchiwania jest tym większy, że węzeł pozostaje w trybie nasłuchiwania znacznie dłużej niż trwa wysyłanie danych. Koszt ten można ograniczać poprzez całkowite wyłączenie odbiornika radiowego, jednak należy pamiętać, że w sieciach WSN nie ma zagwarantowanej synchronizacji pomiędzy węzłami. W konsekwencji, przy zbyt krótkich czasach włączenia interfejsu radiowego może się okazać, że sąsiadujące ze sobą węzły nie są w stanie nawiązać komunikacji.

#### 3.1.2. Tryby pracy i ich koszty energetyczne

Oprócz zadań transmisji i odbioru danych węzły sieci WSN realizują zadania gromadzenia, przechowywania i przetwarzania danych. Zadania te wiążą się z wykorzystaniem różnego rodzaju układów i urządzeń peryferyjnych, które wpływają na rzeczywisty pobór mocy. Z tego względu mikrokontrolery wykorzystywane w węzłach sieci pozwalają na działanie w różnych trybach, w których włączane są tylko wybrane układy peryferyjne. Węzły takie mogą być również wprowadzone w stan uśpienia, w którym pobór mocy jest minimalny.

Opracowane przez nas aplikacje i skonstruowany przez nas układ pomiarowy pozwoliły na pomiar poboru prądu w różnych trybach działania (tab. 2). Pomiary zostały przeprowadzone przy wyłączonym nadajniku radiowym, dzięki czemu można zauważyć, że samo wyłączenie nadajnika radiowego (bez usypiania mikrokontrolera sterującego węzłem) pozwala na niemal czterokrotną redukcję poboru prądu. Wykonane pomiary pokazują również, że opłacalne jest usypianie węzła zawsze, gdy nie jest konieczne wykonywanie żadnych pomiarów i obliczeń. Obserwacja ta jest kluczowa dla większości zastosowań sieci WSN, ponieważ większość z nich przeznaczona jest do monitorowania zjawisk wolno zmiennych.

Tabela 2. Pobór prądu w różnych trybach działania mikrokontrolera węzła MicaZ

Tryb	Prąd [mA]	Tryb	Prąd [mA]
Idle	3,75	Power-down	0,40
Noise reduction	1,40	Power-save	0,45
Standby	0,60	Ext. standby	0,55

#### 3.1.3. Inne koszty

Opisane powyżej pomiary zostały dokonane dla wielu węzłów tego samego typu, aby zaobserwować rozrzut ich parametrów. Pomiary te pozwoliły zauważyć, że wartości prądów pobieranych przez poszczególne węzły nie są identyczne i różnią się w granicach nie przekraczających  $\pm 4\%$ . Niewielkie zmiany poboru prądu (nie przekraczające  $\pm 2\%$ ) zaobserwowano również w sytuacji zmian napię-

cia zasilania węzłów. Pomiary przy napięciach zasilania z dopuszczalnego zakresu 2,5-3,3 V pozwalają zaobserwować jak będzie się zmieniał pobór prądu w czasie życia węzłów, gdy ich zasoby energetyczne będą ulegały wyczerpaniu powodując obniżenie napięcia zasilania.

Interesującą obserwacją jest pobór mocy wprowadzany przez diody LED, w które wyposażone są węzły. Okazuje się, że zapalenie pojedynczej diody zwiększa pobór prądu o 2,8 mA. W porównaniu z wartościami prądów pobieranych przez mikrokontroler i nadajnik radiowy, jest to wartość zaskakująco duża, a w przypadku wykorzystania wszystkich trzech diod, koszt energetyczny z tym związany jest porównywalny z kosztem nadawania z mocą -25 dBm.

### 3.2. Pomiary parametrów komunikacji

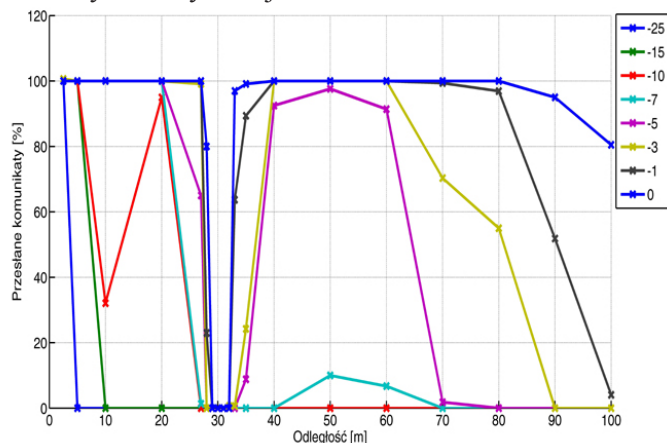
Mając na względzie określone zastosowania sieci WSN w monitorowaniu środowiska, dokonaliśmy szeregu pomiarów parametrów komunikacji radiowej w różnych środowiskach: obszarach leśnych, polach, łąkach oraz w środowisku miejskim.

Badania polegały na przesyłaniu pakietów danych pomiędzy dwoma węzłami. Pakiety były różnej wielkości oraz były wysyłane z różnymi mocami i na różne odległości. Opracowana aplikacja rejestrowała informacje o wysłanych i odebranych pakietach, współczynnikach mocy odebranego sygnału (RSSI) i aktualnej pakietowej stopie błędów w funkcji mocy nadajników, odległości pomiędzy węzłami i ich wysokości nad ziemią.

Zebrane wyniki pozwalają oszacować wspomniane parametry w funkcji następujących czynników:

- otoczenia w którym znajduje się sieć,
- mocy nadajników,
- odległości pomiędzy węzłami i ich wysokości nad powierzchnią gruntu,
- rozmiaru przesyłanych pakietów.

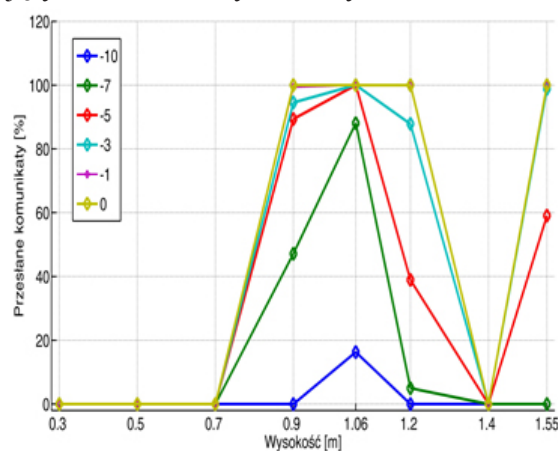
Dodatkowo, na podstawie tych samych pomiarów możliwe jest określenie maksymalnych zasięgów komunikacji dla różnych mocy nadajników.



Rysunek 2. Stopa poprawnie odebranych komunikatów w funkcji odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem i mocy sygnału nadawanego (w dBm). Pomiarów dokonano na płaskiej drodze asfaltowej w obszarze polnym, pozbawionym przeszkód, z węzłami umieszczonymi na wysokości 1,4m.

Wyniki przeprowadzanych pomiarów w dużym stopniu wykazują zgodność z jednym z tradycyjnych modeli komunikacji radiowej – modelem dwupromieniowym. W modelu tym dochodzi do nakładania się bezpośredniego i odbitego sygnału radiowego, co może doprowadzić do jego wzmocnienia lub całkowitego wytłumienia. Wzmacnianie i tłumienie następuje dla różnych odległości pomiędzy węzłami i jest funkcją długości fali i wysokości węzłów nad ziemią. Efekt ten jest tym bardziej widoczny, im bardziej odizolujemy nasz układ od otoczenia, zmniejszając możliwość odbicia fal radiowych od innych przeszkód terenowych. Z tego względu efekt wzmacniania i tłumienia sygnału jest wyraźnie widoczny na otwartych, płaskich obszarach, takich jak pola i łąki.

Opisywaną sytuację można zaobserwować na rys. 2, który przedstawia procentową liczbę odebranych pakietów w funkcji odległości pomiędzy węzłem nadającym i odbierającym, umieszczonymi na wysokości 1,4 m.



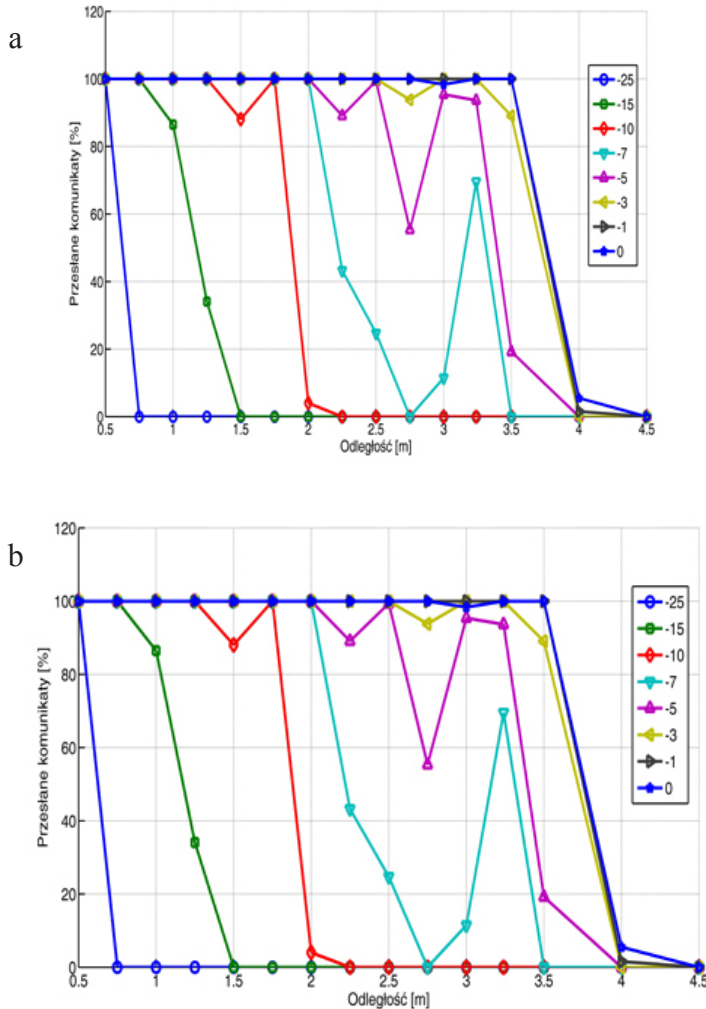
Rysunek 3. Stopa poprawnie odebranych komunikatów w funkcji wysokości węzłów nad ziemią dla odległości 30 m

Maksymalny zasięg komunikacji istotnie zależy również od wysokości anteny (a w konsekwencji całego węzła) nad ziemią. Rysunek 3 prezentuje wyniki pomiarów uzyskane dla różnych wysokości węzłów oddalonych od siebie o 30 metrów i pracujących z różnymi mocami. Jak można zauważyć, przy wysokości poniżej 0,7 m i odległości 30 m komunikacja pomiędzy węzłami jest w ogóle niemożliwa, nawet przy maksymalnej mocy nadajników. Wyraźna poprawa propagacji sygnału następuje przy wysokości około 1 m – dla tej wysokości następuje wzmocnienie sygnału bezpośredniego przez sygnał odbity od podłoża. Zdecydowane pogorszenie następuje w przypadku wysokości 1,4 m, kiedy sygnał bezpośredni jest całkowicie tłumiony przez sygnał odbity.

Analizując maksymalny zasięg komunikacji dla różnych wysokości można zauważyć, że spada on w znaczący sposób, gdy nadajniki znajdują się bezpośrednio na ziemi – szczególnie gdy cała sieć rozmieszczona jest na łące, polu lub w lesie, gdzie sygnał jest dodatkowo tłumiony przez roślinność. Rysunek 4 przedstawia wykresy współczynnika poprawnie przesłanych komunikatów w funkcji odległości i mocy nadajników. Wykres a) przedstawia sytuację, gdy węzły zostały umieszczone na wysokości 1 m. Wykres b) dotyczy sytuacji, w której węzły leżały bezpo-

średnio na ziemi, a bezpośrednia linia komunikacji była zasłonięta przez runo leśne.

Wysoki stopień tłumienia sygnału wynika z tego, że największy wpływ na transmisję mają przeszkody leżące w pierwszej strefie Fresnela [1]. Strefa ta ma kształt cygara rozpiętego pomiędzy antenami i odzwierciedla wpływ efektu dyfrakcji na propagację fal radiowych. Jeżeli przysłoniemy część z tej przestrzeni (np. poprzez obniżenie węzłów lub postawienie przeszkody) duża część promieniowanej energii zostanie pochłonięta przez przeszkodę (grunt) i nie dotrze do anteny odbiorczej. Jest to istotne, ponieważ większość zastosowań WSN,



Rysunek 4. Zasięgi komunikacji w zależności od mocy nadajników (w dBm) dla obszaru leśnego: a) węzły leżące na powierzchni gruntu; b) węzły umieszczone na wysokości 1m

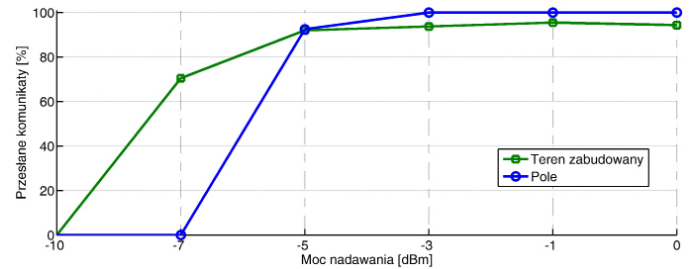
o jakich się mówi, zakłada, że rozmieszczenie węzłów może być w pełni przypadkowe, zazwyczaj na niskich wysokościach lub wręcz bezpośrednio na ziemi.

Wpływ zewnętrznych zakłóceń wynika z wykorzystywanego pasma komunikacji (2,4 GHz), które jest pasmem ogólnego przeznaczenia. Badania przeprowadzone w obszarach, na których działały sieci WiFi wykazały istotny wzrost stopy błędów i spadek efektywnego zasięgu komunikacji. Na rysunku 5 zostały porównane transmisje realizowane dla takich samych wysokości i odległości pomiędzy węzłami, w odmiennych środowiskach – w otwartym polu z dala od terenów zabudowanych i w okolicy kampusu akademickiego, gdzie jest duże natężenie transmisji

bezprzewodowych w paśmie 2.4 GHz.

Wykorzystywany zakres częstotliwości fal radiowych, słaba penetracja przeszkód oraz wąskie strefy Fresnela powodują, że na obszarach płaskich (np. łąki, pola) pojedyncze przeszkody zasłaniające odbiornik/nadajnik uniemożliwiają efektywną komunikację.

Efekt tłumienia sygnału radiowego obserwowany na pustych płaskich obszarach jest niezauważalny w przypadku obszarów o dużej liczbie przeszkód, np. w lesie. Spowodowane to jest odbijaniem sygnału radiowego od wielu przeszkód i docieraniu do odbiornika wielu promieni.



Rysunek 5. Porównanie skuteczności transmisji w różnych środowiskach

O ile więc w obszarach leśnych obserwowane jest skrócenie maksymalnych zasięgów komunikacji, to liczne obiekty w bezpośrednim sąsiedztwie linii komunikacji eliminują tłumienie sygnału radiowego charakterystyczne dla modelu dwupromieniowego. Ponadto, badania wykazały, że brak bezpośredniej widoczności nadajnika i odbiornika nie oznacza braku możliwości bezpośredniego przesyłania

danych. W środowisku leśnym model dwupromieniowy transmisji nie jest właściwy i konieczne jest uwzględnienie większej liczby promieni, które docierają do odbiornika po odbiciu od przeszkód znajdujących się w otoczeniu.

#### 4. Dalsze prace

W toku dalszych prac szczegółowe wyniki pomiarów właściwości komunikacyjnych węzłów sieci oraz zużycia energii zostaną uogólnione na rozległe sieci czujników. Planowane są 2 kierunki badań związane z modelowaniem i symulacją działania sieci WSN oraz wdrożeniem testowej sieci składającej się z kilkudziesięciu węzłów w celu zbierania danych o jej działaniu i weryfikacji skuteczności stosowanych algorytmów w rzeczywistych zastosowaniach.

Planowane są dalsze eksperymenty, mające na celu dokonanie pomiarów i stworzenie realistycznych modeli wykorzystania energii przez węzły sieci WSN. Uwzględniona zostanie energia zużywana podczas komunikacji, czuwania oraz wykonywania obliczeń, a także rozrzut parametrów pomiędzy poszczególnymi urządzeniami. W efekcie pozwoli to dokładnie określić efektywność energetyczną proponowanych i analizowanych algorytmów. Uwzględnienie wpływu na otoczenie oraz niedeterministycznego charakteru transmisji bezprzewodowej w obecności za-



kłóceń pozwoli w realistyczny sposób ocenić niezawodność obecnie stosowanych i analizowanych protokołów zarządzania sieciami WSN.

Ostatecznym celem projektu jest zaproponowanie kompletnego zestawu algorytmów organizacji i monitorowania sieci WSN zapewniających długi czas życia i wysoką niezawodność w zastosowaniach monitorowania środowiska. Najważniejszym założeniem jest rzetelna eksperymentalna analiza skuteczności i niezawodności działania sieci w możliwie realistycznych warunkach.

### Literatura (References)

- [1] A. Dzambaski, D. Trajanov, S. Filiposka, A. Grnarov. Ad hoc networks simulations with real 3d terrains. *15th Telecommunications Forum 2007*, strony 95–98, 2007.
- [2] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *HICSS '00: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8*, strona 8020, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [3] M. Ilyas, I. Mahgoub. *Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems*. CRC, 2005.
- [4] A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm, PT Haneveld, TEV Parker, OW Visser, HS Lichte, S. Valentin. Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision. *Proceedings of the 1st international conference on simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, strona 71. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [5] Bhardwaj Manish, Garnett T., Chandrakasan Anantha, P. Upper bounds on the lifetime of wireless sensor networks. *In Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, wolumen 3, strony 785–790, 2001.
- [6] P. Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 37(2):164–194, 2005.
- [7] K. Sohraby, D. Minoli, T.F. Znati. *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Wiley-Blackwell, 2007.
- [8] A. Varga, i in. The OMNeT++ discrete event simulation system. *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*, wolumen 9, 2001.
- [9] O. Younis, S. Fahmy. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, strony 366–379, 2004.

## Jednoczesne metody znajdowania wartości szczególnych oraz zer wielomianów ortogonalnych

*On Simultaneous Rootfinding Methods for Singular Values and Orthogonal Polynomials*

Iwona Wróbel<sup>1</sup>

**Treść:** Rozważamy zastosowania pewnych metod wyznaczania miejsc zerowych w problemie obliczania wartości szczególnych macierzy dwudiagonalnych.

Proponujemy algorytmy będące modyfikacjami metod klasycznych: Weierstrassa, Abertha i Bairstowa obliczania wszystkich pierwiastków wielomianu. Wykorzystywane są własności rozpatrywanych macierzy zarówno w konstrukcji samego algorytmu jak i odpowiednim doborze wartości początkowych oraz w wyborze warunku zakończenia obliczeń. Rozważane zmodyfikowane metody mogą być również stosowane do wyznaczania pierwiastków wielomianów ortogonalnych.

**Słowa kluczowe:** metody jednoczesnego wyznaczania pierwiastków, wartości szczególne macierzy, wartości własne macierzy, wielomiany ortogonalne.

**Abstract:** We consider applications of certain rootfinding methods for the bidiagonal singular value problem. The problem of computing singular values of a bidiagonal  $n$ -by- $n$  matrix is equivalent to computing eigenvalues of a symmetric tridiagonal  $2n$ -by- $2n$  matrix.

The algorithms we propose are modifications of the classical Weierstrass, Aberth and Bairstow methods for computing all roots of a polynomial. We make use of the properties of the matrix, both in algorithms themselves and in the choice of the initial approximation and the stopping criterion. We also apply these modified methods to finding roots of orthogonal polynomials.

2000 Mathematics Subject Classification: 65F15, 15A18.

**Key words:** Simultaneous rootfinding methods, singular values, eigenvalues, orthogonal polynomials.

### 1. Introduction

In this paper we present several modifications of existing rootfinding algorithms. They may be used for solving several kinds of problems such as finding singular values of matrices, eigenvalues of certain matrices, roots of some orthogonal polynomials.

The algorithms that we consider here are the Weierstrass method (see e.g. [16, 14, 11]), the Aberth method ([1]) and the simultaneous version of the Bairstow method ([10, 13]).

We will start by presenting the details of these problems. Then we will describe the algorithms and their modifications. These modifications can be applied to every simultaneous rootfinding algorithm.

### 2. Singular values and rootfinding methods

In this section we will describe how rootfinding methods can be used to compute the singular values of any matrix.

Let  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  have the singular values  $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_n$ . Recall that they are the square roots of the eigenvalues of the matrix  $A^T A$ . However, methods based on forming  $A^T A$  and computing its eigenvalues may lead to significant loss of accuracy, especially in small singular values.

On the contrary, the problem of computing singular values of bidiagonal matrices is very well conditioned in the sense of the relative error. By a bidiagonal matrix we mean a matrix with nonzero entries located only on the main diagonal and on the superdiagonal. Demmel and Kahan [4] (see also [2, p.90]) proved that all singular values of bidiagonal matrices may be computed with high relative accuracy.

The method we propose here is a variation of the approach first outlined by Golub and Kahan in [7]. They used the fact that any matrix  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  can be decomposed as

$$Q^T A P = B = \begin{pmatrix} c_1 & b_2 & & & & \\ & c_2 & b_3 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & c_{n-1} & b_n & \\ & & & & & c_n \end{pmatrix},$$

<sup>1</sup>Faculty of Mathematics and Information Science, Warsaw University of Technology, Pl. Politechniki 1, 00-661 Warsaw, POLAND, e-mail: wrubelki@wp.pl

where  $Q$  and  $P$  are orthogonal, which guarantees that the singular values of  $A$  and  $B$  are the same. This reduction can be obtained by the Lanczos process or using a finite sequence of Householder transformations, for details see e.g. [2, pp.81-82]. The latter algorithm is backward stable in the following sense. It can be shown that the computed  $\tilde{B}$  is the exact result obtained for a matrix  $A + E$ , where

$$\|E\|_F \leq c n^2 \epsilon_M \|A\|_F,$$

where  $\epsilon_M$  is machine precision and  $c$  is a constant of order unity, see [2, p.83].

Once we have  $B$ , we form a symmetric matrix

$$C = \begin{pmatrix} 0 & B^T \\ B & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}, \quad (1)$$

whose eigen values are  $\pm \sigma_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Permuting rows and columns of  $C$  leads to a symmetric tridiagonal matrix with zeros on the main diagonal,

$$T = P^T C P = \begin{pmatrix} 0 & c_1 & & & \\ c_1 & 0 & b_2 & & \\ & b_2 & 0 & c_2 & \\ & & c_2 & 0 & \ddots \\ & & & \ddots & \ddots & c_n \\ & & & & c_n & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

where  $P$  is a permutation matrix. Since  $T$  and  $C$  have the same spectrum, computation of the singular values of  $A$  is equivalent to computation of the eigenvalues of  $T$ .

As  $T$  is tridiagonal,  $\det(T - zI)$  can be evaluated easily and in a stable way, so methods that compute eigenvalues as roots of the characteristic polynomial find a reasonable application here.

To compute the spectrum of  $T$ , Golub and Kahan used a method based on Sturm sequences, and some variations of QR algorithm, applied to the bidiagonal matrix. We will consider here simultaneous rootfinding methods, the Weierstrass, Aberth and Bairstow methods.

### 3. Simultaneous rootfinding methods

Let  $f(z)$  be a polynomial

$$f(z) = a_m z^m + a_{m-1} z^{m-1} + \dots + a_1 z + a_0, \quad (3)$$

where,  $a_k \in \mathbb{C}$ , for  $k = 0, 1, \dots, m$ .

E. Durand [6] and I. O. Kerner [11] independently have proposed an iterative method for finding all zeros of  $f(z)$  simultaneously. It was a rediscovery of a scheme presented by K. Weierstrass in [16]. This is the reason why this method appears in literature as either the Durand-Kerner method or the Weierstrass method.

Assume that  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  are simple roots of  $f(z)$  and  $z_1^{(0)}, z_2^{(0)}, \dots, z_m^{(0)} \in \mathbb{C}$  are distinct initial approximations to these zeros. The  $k+1$ st iterate of the Weierstrass

method is computed according to the formula

$$z_i^{(k+1)} = z_i^{(k)} - \frac{f(z_i^{(k)})}{a_m \prod_{j=1, j \neq i}^m (z_i^{(k)} - z_j^{(k)})}, \quad (4)$$

for  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Observe that

$$a_m \prod_{j=1, j \neq i}^m (\alpha_i - \alpha_j) = f'(\alpha_i)$$

and

$$a_m \prod_{j=1, j \neq i}^m (z_i^{(k)} - z_j^{(k)}) \approx f'(z_i^{(k)})$$

for  $z_i^{(k)}$  close to  $\alpha_i$ . Hence the Weierstrass method can be interpreted as Newton's method for every root. Hence it should converge quadratically, provided that the roots are simple. Indeed, it is so, which was first shown by Kerner.

The Aberth method (introduced in [1]) uses the following formula to compute  $k+1$ st approximation

$$z_i^{(k+1)} = z_i^{(k)} - \frac{f(z_i^{(k)})}{f'(z_i^{(k)}) - \sum_{j=1, j \neq i}^m \frac{f(z_i^{(k)})}{z_i^{(k)} - z_j^{(k)}}},$$

for  $i = 1, 2, \dots, m$ .

It is a simultaneous version of the Halley method. Analogously, for simple roots, its order of convergence is 3. The argument was given by O. Aberth in [1].

To modify these methods to suit better computing singular values we take into account the fact that the eigenvalues of  $T$  are  $\pm \sigma_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , i.e. they are opposite numbers. Hence we can compute the consecutive approximations of only half of them. The classical Weierstrass formula (4) may be modified to obtain

$$z_i^{(k+1)} = z_i^{(k)} - \frac{f(z_i^{(k)})}{2z_i^{(k)} \prod_{j=1, j \neq i}^n (z_i^{(k)} - z_j^{(k)})(z_i^{(k)} + z_j^{(k)})}, \quad (5)$$

for  $i = 1, 2, \dots, n$ .

The complexity of the classical and modified algorithms counted as a number of complex multiplications is  $2n^2$  and  $4n^2$ , respectively. We omitted here the cost of computing  $f(z_i^{(k)})$ .

Similar modification of the classical Aberth formula leads to the following iteration

$$z_i^{(k+1)} = z_i^{(k)} - \frac{f(z_i^{(k)})}{f'(z_i^{(k)}) - f'(z_i^{(k)}) \left( 2 \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{z_i^{(k)}}{(z_i^{(k)} - z_j^{(k)})(z_i^{(k)} + z_j^{(k)}) + \frac{1}{2z_i^{(k)}} \right)} \quad (6)$$

for  $i = 1, 2, \dots, n$ .

The complexity of the classical and modified methods is respectively  $4n^2$  and  $2n(n+1)$ , plus the cost of computing  $f(z_i^{(k)})$  and  $f'(z_i^{(k)})$ .

In the Bairstow method we seek the quadratic factors  $(z^2 - rz - q)$  of the polynomial  $f(z)$ . In our problems we have only opposite roots, so we may assume that all factors are of the form  $(z^2 - q)$ . We will use this assumption from now on and the algorithms will be presented only in this setting.

Let  $(z^2 - r^{(0)}z - q^{(0)})$  be the approximation of the quadratic factor of  $f(z)$ .

Then

$$f(z) = (z^2 - q^{(0)})f_1(z) + Rz + S,$$

and

$$f_1(z) = (z^2 - q^{(0)})f_2(z) + R_1z + S_1.$$

The Bairstow method can be written as

$$\begin{pmatrix} 0 \\ q^{(k+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ q^{(k)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} S_1 & R_1 \\ R_1q^{(k)} & S_1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R \\ S \end{pmatrix},$$

for  $k = 0, 1, \dots$

Here we assumed that the initial and computed approximations of the coefficient of the middle term of all quadratic factors are zero.

To avoid deflation this process may be changed to compute simultaneously consecutive approximations of all quadratic factors of  $f(z)$ . This approach was proposed by D. C. Handscomb in [10], then further developed by W. S. Luk in [13].

Here we will present a simpler version of their algorithm, which we modified to suit better the problem we are interested in, i.e. polynomials with opposite roots.

First we need a method of suppression of computed quadratic factors of  $f(z)$ . Assume that a factor  $(z^2 - \hat{q})$  has already been found. Then we want to carry on the Bairstow method on the deflated polynomial  $\hat{f}(z) = f(z)/(z^2 - \hat{q})$  without explicitly constructing  $\hat{f}(z)$ . It is possible, because we only need the coefficients of the linear reminders of  $\hat{f}(z)$  and  $\hat{f}_1(z)$ , where

$$\hat{f}(z) = (z^2 - \hat{q})\hat{f}_1(z) + \hat{R}z + \hat{S}$$

and

$$\hat{f}_1(z) = (z^2 - \hat{q})\hat{f}_2(z) + \hat{R}_1z + \hat{S}_1.$$

D. C. Handscomb (see [10]) found that the relation between  $R, S, R_1, S_1$  and  $\hat{R}, \hat{S}, \hat{R}_1, \hat{S}_1$ , is the following

$$\begin{aligned} l &= q - \hat{q}, \\ \hat{R} &= Rl^3, \\ \hat{S} &= Sl^3, \\ \hat{R}_1 &= (R_1l - R)l^2, \\ \hat{S}_1 &= (S_1l - S)l^2. \end{aligned}$$

We stated these formulae in simplified form, suited for our problem. They are much simpler than original ones (compare [13] or [10]).

The simultaneous version of the Bairstow method works as follows. Choose  $q_i^{(0)}, i = 1, 2, \dots, n$ , the initial approximations to the coefficients  $q$  of the quadratic factors. Then apply one step of the Bairstow method to each of them, treating all other as computed factors and per-

form suppression as described above.

The whole algorithm:

Choose initial approximations  $q_i^{(0)}, i = 1, 2, \dots, n$ ,  
for  $k = 1, 2, \dots$  until convergence do  
for  $i = 1, \dots, n$  do

find  $R, S, R_1, S_1$  using  $q_i^{(k)}$

for  $j = 1, \dots, n, j \neq i$  do

$$l := q - \hat{q}$$

$$\hat{R} := Rl^3$$

$$\hat{S} := Sl^3$$

$$\hat{R}_1 := (R_1l - R)l^2$$

$$\hat{S}_1 := (S_1l - S)l^2$$

end

find  $q_i^{(k+1)}$  by the Bairstow method

end

end

#### 4. Zeros of orthogonal polynomials

The above modification can also be used for computing the zeros of certain orthogonal polynomials.

Any set of orthogonal polynomials

$\{p_0(x), p_1(x), \dots, p_m(x)\}$  satisfies a three term recurrence relation

$$p_k(x) = (p_kx + q_k)p_{k-1}(x) - r_kp_{k-2}(x), \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

with  $p_{-1}(x) \equiv 0, p_0(x) \equiv 1$ , where  $p_k > 0, r_k > 0$ .

It can be shown (see [17] and [9]), that the zeros of  $p_m(x)$  are the eigenvalues of

$$T = P^T C P = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & & & \\ \beta_1 & \alpha_2 & \beta_2 & & \\ & \beta_2 & \alpha_3 & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & \beta_{m-1} \\ & & & \beta_{m-1} & \alpha_m \end{pmatrix},$$

where

$$\alpha_i = -\frac{q_i}{p_i}, \quad \beta_i = \left( \frac{r_{i+1}}{p_i p_{i+1}} \right)^{1/2}.$$

Zeros of many orthogonal polynomials are opposite numbers, hence our modifications of rootfinding methods can be applied here.

#### 5. Numerical tests

This paragraph contains the results of the tests performed in Matlab, with machine precision  $\epsilon_M \approx 2.2 \cdot 10^{-16}$ .

We implemented the modified Weierstrass method and compared the results it gave either with the exact solution or with the results given by the built-in Matlab function "svd". In all tests we computed the componentwise relative



error

$$\max_{k=1,\dots,n} \frac{|\sigma_k - \tilde{\sigma}_k|}{\sigma_k}, \quad (8)$$

where  $\sigma_k$  and  $\tilde{\sigma}_k$ ,  $k = 1, \dots, n$  are the respective exact (or given by "svd") and computed singular values of a matrix  $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ .

The situation where we know the exact solution is quite rare. However, there is one class of matrices that is very useful for tests, namely the Clement matrices, see [3]. These are matrices of the form

$$T_m = \begin{pmatrix} 0 & t_1 & & & & \\ t_1 & 0 & t_2 & & & \\ & t_2 & 0 & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & t_{m-1} & \\ & & & & t_{m-1} & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

where  $t_k = \sqrt{k(m-k)}$  for  $k = 1, \dots, m$ . The spectrum of  $T_m$  consists of opposite integer numbers and possibly zero, if  $m$  is odd, i.e.  $\sigma(T_m) = \{\pm(m-1), \pm(m-3), \dots, \pm 1\}$  or  $\sigma(T_m) = \{\pm(m-1), \pm(m-3), \dots, 0\}$ .

For our tests it is convenient to assume that  $T_{2n}$  is a matrix of the form (2), obtained (via bidiagonalization, forming a matrix  $C$  (see (1)) and permuting its rows and columns), from some unknown matrix  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ , whose singular values are the eigenvalues of  $T_{2n}$ . Note that  $\sigma(T_{2n}) = \{\pm(2n-1), \pm(2n-3), \dots, \pm 1\}$  and, as  $T_{2n}$  is symmetric, its condition number is equal to  $2n-1$ , so  $T_{2n}$  is well-conditioned if the dimension is not too big.

Figure 1 presents the results of tests of the Weierstrass method for Clement matrices. The value of the logarithm of the relative error (8) at the final step is plotted against the half of the dimension of the Clement matrix. As initial approximations we took equally distributed points from the interval  $[\|T_{2n}\|_\infty/(n+1); \|T_{2n}\|_\infty]$  and numbers opposite to them. As a termination criterion we used Gill's criterion

$$\text{STOP if } \|s^{(k+1)} - s^{(k)}\|_\infty < \delta \|s^{(k+1)}\|_\infty + \epsilon_M, \quad (10)$$

where  $s^{(k)}$  is a vector of approximations at the  $k$ th step,  $\delta$  is a tolerance and  $\epsilon_M$  is a machine precision. In all tests with Clement matrices  $\delta = 1e-12$ .

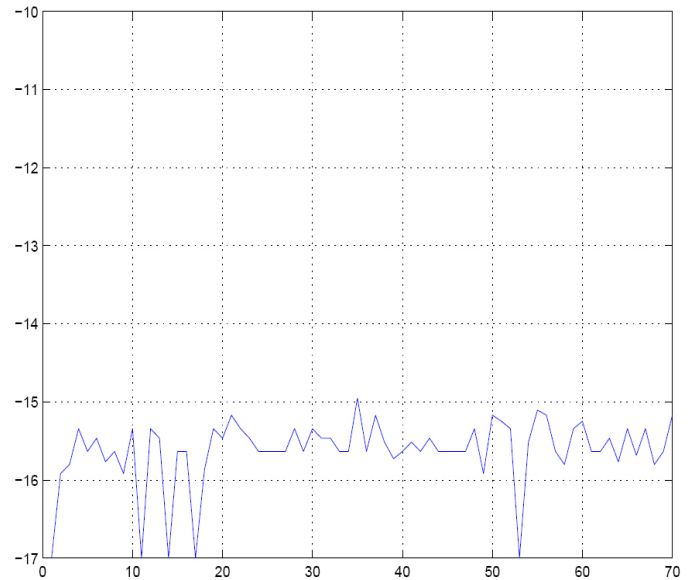


Figure 1: The logarithm of the relative error (8) of the Weierstrass method for Clement matrices.

We can see that the results are very satisfactory. However, the situation can change significantly if we change initial approximations. Figure 2 presents the results for analogous tests with different initial guess, namely equally distributed points from the interval  $[\|T_{2n}\|_\infty/n; \|T_{2n}\|_\infty]$  and numbers opposite to them.

We tried many different starting approximations and it turned out that very often the method breaks down for some  $n$ . The values of  $n$  for which the method does not work strongly depend on the initial guess. Moreover, large matrices also present a problem, for  $n > 150$  it is hard to find initial guess for which the method works.

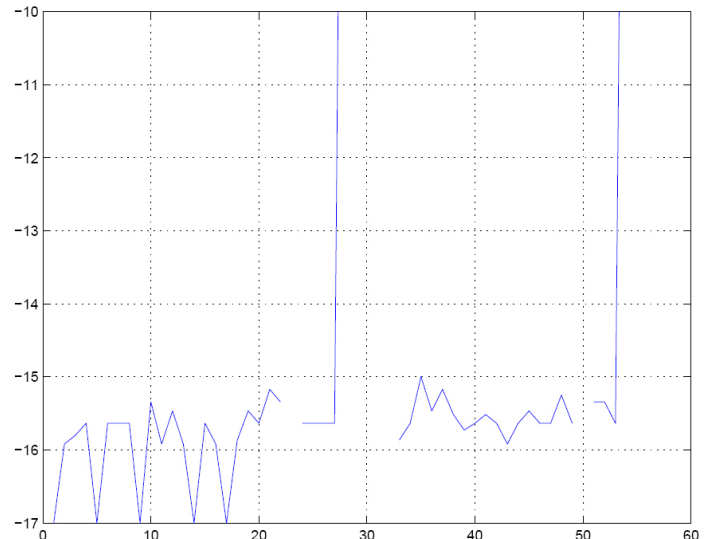


Figure 2: The logarithm of the relative error (8) of the Weierstrass method for Clement matrices.

These breakdowns are mainly due to the overflow, so some method of scaling may help to improve the behaviour of this algorithm.

On the other hand, the method is very fast, as predicted. The number of iterations required to obtain desired accuracy grows slowly with  $n$ , for  $n = 150$  in our test it was

8.

The same tests we performed for the Aberth method. The results and conclusions are similar. This method is also very sensitive to the choice of initial guess. And, if it works, it is usually slightly faster than the Weierstrass method, which is not surprising, as its order of convergence is also greater.

In the case of the Bairstow method the situation is different. The method works fine and is not too sensitive for the choice of initial guess. However, for larger matrices it converges very slowly or not at all, which shows already for  $40 \times 40$  matrices. This may be partially caused by the fact, that the inner loop in the algorithm is performed for all  $j = 1, \dots, n, j \neq i$ , i.e. all factors are suppressed, except the current updated one. If, instead of all, we suppress only a couple of factors around the current one, it may in some cases improve the convergence.

The next group of tests was performed on matrices of the form

$$B = \begin{pmatrix} 1 & b & & \\ & 1 & b & \\ & & 1 & b \\ & & & 1 \end{pmatrix}, \quad b \in \mathbb{R}. \quad (11)$$

This time we computed the singular values of  $B$  by forming an appropriate matrix  $T \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$  (see (2)) and, as the exact results are not known, we compared the results given by the modified Weierstrass algorithm with the ones given by the Matlab function "svd".

For larger values of  $b$  one of the singular values of  $B$  is significantly smaller than the others, which results in loss of accuracy. This is already visible for  $b \geq 10$ . Hence iterative refinement is recommended, for example by means of Newton's method applied to the smallest singular value.

The Tables 1, 2 and 3 present the results for matrices of the above form (11) for different values of the parameter  $b$ , respectively, for the modified Weierstrass, Aberth and Bairstow methods. As  $b$  increases, the condition number grows and results become less accurate. The last two columns contain the values of the relative componentwise error

$$\max_{k=1, \dots, 4} \frac{|\sigma_k(svd) - \tilde{\sigma}_k|}{\sigma_k(svd)},$$

and the absolute componentwise error

$$\max_{k=1, \dots, 4} |\sigma_k(svd) - \tilde{\sigma}_k|,$$

where  $\sigma_k(svd)$  and  $\tilde{\sigma}_k$ ,  $k = 1, \dots, 4$  are the singular values computed by the "svd" function and the Weierstrass or the Aberth algorithm, respectively. The tolerance  $\delta$  (see (10)) in these tests was  $1e-13$ , the initial approximations were chosen as before.

Table 1: Results for the modified Weierstrass method for the matrix (11) for different values of  $b$ .

$b$	$\text{cond}(B)$	iterations	relative error	absolute error
0.01	1.0163	31	$1.1192e-16$	0
0.1	1.1757	14	$2.1483e-16$	0
10	$1.0850e+04$	19	$6.5709e-16$	$6.5052e-19$
100	$1.0072e+08$	32	$2.1177e-16$	$1.4210e-14$
1000	$1.0007e+12$	43	$2.3524e-04$	$1.1368e-13$

In Table 2 we see that the Aberth method did not work for  $b > 8.99$ . This is only for this particular initial guess. For some initial approximations this method worked well: the results were very close to these given by the function "svd" (error of order  $1e-16$ ). The problem is to find such initial guess, as it very strongly depends on the matrix. We were not able to find a general formula that would work for a family of matrices.

Table 2: Results for the modified Aberth method for the matrix (11) for different values of  $b$ .

$b$	$\text{cond}(B)$	iterations	relative error	absolute error
0.01	1.0163	10	$1.1193e-16$	$1.1102e-16$
0.1	1.1757	10	$2.1483e-16$	$2.2204e-16$
7	$2.7149e+03$	18	$3.0370e-16$	$1.7764e-15$
8.98	$7.1304e+03$	68	$3.9201e-16$	$3.5527e-15$
$\geq 8.99$		no convergence		

Table 3: Results for the modified Bairstow method for the matrix (11) for different values of  $b$ .

$b$	$\text{cond}(B)$	iterations	relative error	absolute error
0.01	1.0163	10	$1.9644e-11$	$3.9290e-11$
0.1	1.1757	6	$8.5244e-14$	$1.7112e-13$
10	$1.0850e+04$	7	$5.4864e-16$	$9.5659e-15$
100	$1.0072e+08$	8	$2.1918e-13$	$3.7966e-11$
1000	$1.0007e+12$	>9	$2.2341e-11$	$3.8696e-08$
10000	$1.0000e+16$	13	$3.9409e-09$	$6.8258e-05$

In the test for  $b = 1000$  in Table 3 errors of the results given by the Bairstow method were the same for any number of iterations between 9 and 1000.

Next group of tests is involves orthogonal polynomials. These tests were performed for Chebyshev polynomials, whose zeros are known, which makes it possible to verify the results.

Table 4 presents results for the Chebyshev polynomials. The first column contains the degree of the polynomial, the second and the third contain the relative error and number of iterations for the Weierstrass method, the last two columns present the same data for the Aberth method. The condition numbers of corresponding matrices are quite modest, they do not exceed 100. We used analogous initial approximations as in the case of Clement matrices, and the same stopping criterion with the tolerance  $1e-13$ .

Table 4: The relative errors of the modified Weierstrass (W) and Aberth (A) methods for Chebyshev polynomials.

$n$	iterations (W)	relative error (W)	iterations (A)	relative error(A)
10	14	$1.2161e-16$	8	$1.2161e-16$
20	12	$1.2482e-16$	7	$1.2482e-16$
30	21	$1.2300e-16$	12	$1.2132e-16$
50	198	$1.3839e-16$		no convergence
100		no convergence	30	$1.5338e-16$
150		no convergence	37	$1.3554e-16$

## 6. Conclusions

In this paper we presented certain modifications of classical rootfinding algorithms. These modified methods may be used for example for computing the singular values of matrices or roots of orthogonal polynomials.

Numerical tests performed in Matlab show that these algorithms have good numerical properties, if the zeros are well separated and the initial guess is sufficiently close to the exact solution. Therefore it can be recommended as a method of choice, especially if combined with some techniques of iterative refinement. Moreover, in all algorithms, the classical versions and the modified ones, some parts are computed independently. Hence parallel implementation may be a good choice here.

## References (Literatura)

- [1] O. Aberth, Iteration methods for finding all zeros of a polynomial simultaneously, *Math. Comput.* 27 (122) (1973), 339-344.
- [2] Å. Björck, *Numerical Methods for Least Squares Problems*, SIAM, Philadelphia, PA, USA, 1996.
- [3] P. A. Clement, A class of triple-diagonal matrices for test purposes, *SIAM Review* 1 (1) (1959), 50-52.
- [4] J. Demmel and W. Kahan, Accurate singular values of bidiagonal matrices, *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 11 (1990), 873-912.
- [5] K. Dočev, Modified Newton method for the simultaneous approximate calculation of all roots of a given algebraic equation, *Mat. Spis. Bulgar. Akad. Nauk* 5 (1962), 136-139, (in Bulgarian).
- [6] E. Durand, *Solutions Numériques des Équations Algébriques, Tome I: Equations du Type  $F(x) = 0$  : Racines d'un Polynôme*, Masson, Paris, 1960.
- [7] G. H. Golub and W. Kahan, Calculating the singular values and pseudo-inverse of a matrix, *SIAM J. Num. Anal. Ser. B*, 2 (2) (1965), 205-224.
- [8] G. H. Golub and Ch. F. Van Loan, *Matrix Computations*, Third Edition, The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, 1996.
- [9] G. H. Golub and J. H. Welsch, Calculation of Gauss quadrature rules, *Math. Comp.*, 23 (1969), 221-230.
- [10] D. C. Handscomb, Computation of the latent roots of a Hessenberg matrix by Bairstow's method, *Computer J.* 5 (1962), 139-141.
- [11] I. O. Kerner, Ein Gesamtschrittverfahren zur Berechnung der Nullstellen von Polynomen, *Numer. Math.* 8 (1966), 290-294.
- [12] T. Y. Li, N. H. Rhee, Z. Zeng, An efficient and accurate parallel algorithm for the singular value problem of bidiagonal matrices, *Numer. Math.* 69 (1995), 283-301.
- [13] W. S. Luk, Finding roots of real polynomial simultaneously by means of Bairstow's method, *BIT* 35 (2) (1996), 302-308.
- [14] M. Petković, *Iterative Methods for Simultaneous Inclusion of Polynomial Zeros*, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1989.
- [15] G. W. Stewart, *Introduction to Matrix Computations*, Academic Press, New York, 1973.
- [16] K. Weierstrass, Neuer Beweis des Fundamentalsatzes der Algebra, in *Mathematische Werke, Tome III*, Mayer und Mueller, Berlin, 1903, 251-269.
- [17] H. Wilf, *Mathematics for Physical Sciences*, Wiley, New York, 1962.

## Wpływ technik rozpoznawania wzorców na ocene złośliwości nowotworów piersi

### *Influence of Pattern Recognition Techniques on Breast Cytology Grading*

**Łukasz Jeleń<sup>1</sup>, Adam Krzyżak<sup>2</sup>, Thomas Fevens<sup>2</sup>, Michał Jeleń<sup>3</sup>**

**Treść.** W niniejszym artykule prezentujemy zastosowania technik rozpoznawania wzorców oraz analizy obrazu do automatycznej obróbki i analizy obrazów cytologicznych. W celu wskazania nowych wyzwań w tej dziedzinie przegląd literatury związanej z tym zagadnieniem został zaprezentowany. Ocena złośliwości nowotworów piersi jest skomplikowanym problemem gdzie doświadczenie jest bardzo istotne i może mieć wpływ na końcową diagnozę. Zastosowanie komputerowego systemu oceny pozwoli na zobjektywizowanie tego procesu. Artykuł prezentuje liczne zastosowania technik rozpoznawania wzorców w odniesieniu do zdjęć cytologicznych nowotworów piersi w celu lepszej separowalności nie tylko między komórkami nowotworowymi i zdrowymi, ale także między stopniami złośliwości. Wyznaczenie stopnia złośliwości jest bardzo istotne w diagnostyce, ponieważ ma wpływ na wybór sposobu leczenia. W niniejszym artykule prezentujemy także porównanie trzech sieci neuronowych wykorzystanych do oceny zdjęć cytologicznych piersi oraz porównujemy ich działanie z perceptronem wielowarstwowym opisanym w literaturze.

**Słowa kluczowe:** aspiracyjna biopsja cienkoigłowa, ocena złośliwości nowotworów piersi, rozpoznawanie wzorców

**Abstract.** In this paper we discuss applications of pattern recognition and image processing to automatic processing and analysis of cytological images. The literature survey of the problem is presented to point out new challenges. The breast cancer malignancy grading is a difficult procedure that involves a lot of experience which can have an impact on the diagnosis. A role of the computerized system is to help to make the diagnosis process more objective. The paper presents numerous applications of the pattern recognition techniques to breast cancer cytology to produce better discriminations not only between cancerous and healthy cells but also malignancy grades. Determination of the malignancy grade is crucial during the diagnosis because it will have an impact on the patient treatment. In the paper we also present a comparison of three neural networks applied to the breast cytology and compare them to the multilayer approach from the literature.

**Keywords:** fine needle aspirates, breast cancer malignancy grading, pattern recognition

### 1. Introduction

Automatic detection of pathologies from histopathological and cytological images is currently a very active and important area of research. In the present paper we will survey application and influence of pattern recognition techniques on automatic grading of breast cancer fine needle biopsy slides. We will focus on automatic cancer grading because it is a very challenging task due to large variation in cancer imaging and analysis. Section 2 consists of the review of pattern recognition applied to breast cancer diagnosis as this is the main research interest but in the remainder of the paper we shall focus on automatic malignancy grading of breast cancer fine needle aspiration biopsies.

### 2. Breast Cancer Diagnosis

According to statistics breast cancer is one of the most deadly cancers among middle-aged women. Based on the data provided by the Breast Cancer Society of Canada about 415 women will be diagnosed with breast cancer each week in Canada. Most of the diagnosed cases can be fully recovered when diagnosed at an early stage. Cancers in their early stages are vulnerable to treatment while cancers in their most advanced stages are usually almost impossible to treat. During the diagnosis process, the cancer is assigned a grade that is used to determine the appropriate treatment. Successful treatment is a key to reduce the high death rate. The most common diagnostic tools are a mammography and a fine needle aspiration biopsy (FNA). Mammography, which is a non-invasive method, is most often used for screening purposes rather than for precise diagnosis. It allows a physician to find possible locations of microcalcifications and other indicators in the breast tis-

<sup>1</sup>Wrocław School of Applied Informatics, Wejherowska 28, 54-239 Wrocław, Poland, ljelen@horyzont.eu

<sup>2</sup>Department of Computer Science and Software Engineering, Concordia University, 1455 De Maisonneuve Blvd. West, Montréal, Québec, Canada H3G 1M8, krzyzak@cs.concordia.ca, fevens@encs.concordia.ca

<sup>3</sup>Department of Pathology and Clinical Cytology, Medical University of Wrocław Borowska 213, 50-556 Wrocław, Poland, jelen@anpat.am.wroc.pl



sue. When a suspicious region is found, the patient is sent to a pathologist for a more precise diagnosis. This is when the FNA is taken. A fine needle aspiration biopsy is an invasive method to extract a small sample of the questionable breast tissue that allows the pathologist to describe the type of the cancer in detail. Using this method pathologists can very adequately describe not only the type of the cancer but also its genealogy and malignancy. The determination of the malignancy is essential when predicting the progression of cancer.

## 2.1. Computer-aided Breast Cancer Diagnosis

Breast cancer diagnosis is a very wide field of research studying not only medical issues but also computer science issues. Breast cancer diagnosis is a multi-stage process that involves different diagnostic examinations.

Pattern classification is a well-known problem in the field of Artificial Intelligence concerned with the discrimination between classes of different objects [1]. We can use the same techniques in cancer diagnosis to assist doctors with their decisions. Cheng et al. [2] provided an extensive survey on automated approaches in mammograms classification and importance of computer assisted diagnosis. Since mammography is one of the preliminary tests performed to locate abnormalities in the breast tissue, it is used for screening purposes and has raised a lot of interest within the scientific community [2–8].

To the best of our knowledge, the computerized breast cytology classification problem was first investigated by Wolberg et al. in 1990 [9]. The authors described an application of a multi-surface pattern separation method to cancer diagnosis. The proposed algorithm was able to distinguish between a 169 malignant and 201 benign cases with 6.5% and 4.1% error rates, respectively depending on the size of the training set. When 50% of samples were used for training, the method returned a larger error. Using 67% of sample images reduced the error to 4.1%. The same authors introduced a widely used data-base of pre-extracted features of breast cancer nuclei obtained from fine needle aspiration biopsy images [10]. Later, in 1993, Street et al. [11] used an active contour algorithm, called ‘snake’ for precise nuclei shape representation. The authors also described 10 features of a nucleus used for classification. They achieved a 97.3% classification rate using multi-surface method for classification. The features described by the authors are mainly geometrical features of the nucleus. Based on these features, Street [12], in his PhD Thesis introduced a system called XCyt. In 1999, Lee and Street [13] described an iterative approach for automated nuclei segmentation as an addition to the previously described framework. In 2003, they introduced flexible templates to their iterative Generalized Hough Transform approach for segmentation. They created a set of predefined templates of a nuclei and each iteration shuffles the templates in such a way that those that were used the most often during the previous iteration are visited first to save time. The authors

were able to segment nuclei with 78.19% accuracy [14]. They also introduced a neural network approach for classification stage, achieving 96% accuracy. Classification was based on the features previously described by Street et al. [11].

All work presented above was based on the Wisconsin Breast Cancer Database (WBCD) introduced by Mangasarian et al. [10]. This data-base consists of pre-extracted nuclear features and is widely used among researchers. Features included in the data-base are the features proposed by Street et al. [11]. WBCD [10] and its variations [15, 16] are the only data sets publicly available. Therefore, the majority of work in this field is performed on this data-base and involves research on different classification algorithms. In 1998, Walker et al. [17, 18] introduced Evolved Neural Networks for breast cancer classification and tested their algorithm on WBCD data-base achieving 96% correctness. Nezafat et al. [19] used WBCD to compare several classification algorithms such as k-nearest neighbor classifier, radial-basis function, neural networks, multilayer perceptron and probabilistic neural networks. The authors showed that among these classifiers, multi-layer perceptron with one hidden layer performed the most efficiently giving 2.1% error rate. Additionally they also compared and reported which of the features extracted by Wolberg et al. [9] were most significant for classification. In 2002, Estevez et al. [20] introduced a different approach for classification based on the Fuzzy Finite State Machine, but their system performed rather poorly giving 19.4% error for the testing set of images. To extract features, the authors first manually segment nuclei from the image and then apply a low-pass filter and in the following step topological map of a nuclei is created. The extracted features are texture based. Motivation for them was that benign cell textures have bigger homogenous gray areas and more concentric contours than malignant cell textures. Bagui et al. [21] recently introduced a classification algorithm applied to WBCD. The authors described a generalization of the rank nearest neighbor rule and obtained results that show a 97% recognition rate, which, according the authors, is better than that previously reported in the literature. From the above discussion we can deduct that majority of work in the field of breast cancer detection and classification was performed by Street et al. and Wolberg et al. We can find other approaches such as wavelet based approach of Weyn et al. [22]. Here the authors introduce a textural approach for chromatin description and claim that it has a 100% recognition rate.

Another approach is one introduced by Schnorrenberg et al. [23] that uses receptive fields for nuclei localization as an integral part of a bigger system, called ‘BASS.’ In 1996, they introduced a content-based approach [24] and provided an extensive survey on existing histopathological systems [25]. The authors presented two types of color-based features, luminance-based local features and global features. Luminance features were obtained from image RGB values. Global features are the variance and average of luminance in the image. They also introduce

one texture measure that is calculated according to the luminance variance and current nucleus luminance. Approaches presented by Schnorrenberg et al. are mostly based on histological samples rather than cytological. In 2000, they presented a description of features used in their research [26] on classification of cryostat samples during intra-operative examination based on feed-forward neural networks achieving the highest accuracy of 76% on their own database.

In the literature we can also find some other approaches that involve segmentation of a breast cancer nuclei rather than classification. In 1996, Belhomme *et al.* [27] proposed a watershed based algorithm for segmentation of breast cancer cytological and histological images. Their algorithm is a more general version of the method described by Adams and Bischof [28]. The generalization involves the usage of numerous merging criteria. Authors use the segmentation principles described by Beucher in his PhD thesis [29]. This involves the decomposition of the segmentation procedure into two steps. In the first step, the image is simplified based on a set of markers. The second stage involves region decomposition by the construction of the watershed lines [27]. The algorithm proposed by Belhomme *et al.* is the extension of the Beucher and Meyer [30] method by introduction of a general segmentation operator.

In 1998, Olivier *et al.* [31] introduced another extension to the watershed algorithm in addition to that of Belhomme *et al.* Their extension incorporates the color information in the image regardless of the color space. The authors compared their segmentation results against the segmentation performed by three experts and they reported the correctness of their method to be between 89.2% and 98.3% for the nuclei.

Another approach to nuclear segmentation is based on fuzzy c-means clustering and multiple active contours models described by Schüpp *et al.* [32]. The authors describe a level set active contours method, where the initial level set is obtained by the fuzzy c-means algorithm.

## 2.2. Computer-aided Breast Cancer Grading

In the previous section we described different approaches for breast cancer diagnosis. Most of those systems discriminate only benign and malignant cases. For good diagnosis it is crucial to evaluate the malignancy grade. In cytology, the malignancy is graded according to the Bloom-Richardson scheme [33]. This system is based on grading of cells' polymorphy, the ability to reform histoformative structures, and mitotic index. All of these features are described by the Bloom-Richardson scheme as three factors that use a point based scale for assessing each feature. The malignancy of the tumor is assigned a grade that depends on the quantitative values of the above factors and is determined by the summation of all awarded points for each factor. Depending on the value, the tumor is assigned with low, intermediate or high malignancy

grade. In [34] we can see attempts at prognostication along with nuclear classification. For their grading approach, the authors used only nuclear features of a cell, which correspond to the second factor in Bloom-Richardson grading scheme. They were estimating the prognosis of the breast cancer according to these features. Further attempts for malignancy grading include VLSI approach introduced by Cheng et al. [35] in 1991 and applied in 1998 to breast cancer diagnosis [36]. In this method, the authors propose a parallel approach to tubule grading for histological slides. The authors divided their algorithm into four stages. The first stage consists of image enhancement for which purpose they use median filtering to remove artifacts. In stage two, the authors locate possible tubule formations by image thresholding with a threshold level known *a priori*. The next stage is a classification stage, where regions are classified as tubular formations. The features used in this study consists of brightness, bright homogeneity, circularity, size, and boundary colors. In the fourth stage, the authors count the number of tubular formations. The work presented by the authors not only deals with histology but also only mentions grading using only one factor on the Bloom-Richardson scale. The authors showed time improvement of the parallel algorithm that grades tubules to  $O(n)$  time while previously reported run time complexities were  $O(n^2)$ , where  $n$  is the size of the input data. In 1991, MacAulay *et al.* [37] introduced a graphics package for Bloom-Richardson grading of histological tissue. Their application acts as a typical graphics program that allows user to pick the nuclei from the image and perform some basic calculations. This process is almost completely user dependent. The authors provide an extensive description of the interface of the package but no further information on computation grading was found. Another approach found in literature is an algorithm based on wavelet texture description of chromatin [22]. This work was also performed on histological slides. The features calculated by the authors are calculated according to wavelet parameters and are divided into three groups. The first group are co-occurrence parameters that describe the color intensity in the image. The second set of parameters are densitometric parameters that are based on intensity values of the nucleus. The third group consists morphometric parameters that describe the geometry of the nucleus. Authors performed tests on their data-base of 83 histological slides and claim to have 100% classification rate. Such a high rate suggests a good separation between the classes. In 2004, Gurevich and Murashov [38] proposed a method for chromatin structure analysis based on scale-space approach of Florack and Kuijper [39]. The authors claim that chromatin distribution corresponds to the grade of malignancy. This statement is supported by additional studies of Rodenacker [40, 41, 42] and Weyn *et al.* [43]. The authors also mention another approach to chromatin description. This method uses heterogeneity, clumpiness, margination and radius of particles and was introduced by Young *et al.* [44]. The algorithm of Guverich and Murashov uses topological properties of iso-intensity manifolds

in the spatial extrema neighborhoods [38]. Their algorithm is able to measure the number of chromatin particles in the input image. For testing purposes the authors trained several classifiers achieving a classification rate between 72% and 85.4%. In 2006, Gurevich *et al.* [45] described a system for automatic analysis of cytological slides for the lymphatic system tumors. The authors used a Gaussian filter for segmentation of a nuclei from the previously extracted blue channel of the image. The feature extraction part of the proposed system is the same as in [38] plus an additional 47 features described by Churakova *et al.* [46]. These features include a well known and widely used morphological features such as the area of a nuclei, histogram features and features based on a Fourier spectrum of a nucleus [45]. In this paper, the same choice of classifiers was used as in [38] but the accuracy increased and is claimed by the authors to be above 90%. The authors did not provide an accurate error rate of their experiments and therefore it is difficult to assess the accuracy of the proposed system.

To the best of our knowledge, currently there is no publicly available database and most of the approaches presented in the literature are tested on the databases created by the authors, which makes the comparison of the obtained classification results with those reported in the literature difficult. The only commonly used database that we came across during this study is the Wisconsin Breast Cancer Database, which was described earlier in this thesis. This database is freely available from the authors web page [9]. In this study, some of the proposed features are the same as in WBCD but the testing of the presented system on that database would be limited only to the classification stage due to the fact that WBCD is a database of pre-extracted features.

In 2005 a commercial system for automated histopathological tissue grading was released by QinetiQ [47]. According to the specifications and discussion with a pathologist, the results obtained by this system seem to be difficult to confirm. According to the authors, their system showed performance similar to the pathologists during clinical evaluation that was performed on 100 patients.

The most recent development in the field of automated breast cancer grading was described by Jeleń in his PhD

thesis [48]. There are also other recent approaches by Naik *et al.* [49] and Jeleń *et al.* [50–54].

In [49] describe various segmentation methods such as level sets for classification of prostate and breast cancer histological slides. The described system was able to distinguish between low and high malignancy grades with 80.52% accuracy when automatic classification was used. The accuracy described by Jeleń in [48] was as high as 86.75% for cytological slides. The author in his thesis did an extensive study of the features and classification methods to determine a set of features and the classification method that will be able to classify the breast cancer malignancy into intermediate and high malignancy grades. Author also introduced a set of three new features that are used for the determination of the first factor of Bloom-Richardson scheme. These features were described in [50] and their discriminatory power were described in [52]. Features that were introduced by Jeleń include the area of grouped cells in the FNA slide (see Fig. 1), the number of groups that are visible on the slide and the third feature is a dispersion that describes if the cells in the image are grouped or dispersed. Beside a set of so called low magnification features author proposed the usage of 31 features that represented the nuclear structures of the cell. These features related to the second and third factor of the Bloom-Richardson grading scheme. In the thesis, the author performed a set of classification tests performed the calculations of the discriminatory power of the features to propose a set of features that are not correlated and provide the best classification results. From all of the tests, the author showed that the multilayer perceptron was the best performing classifier. The 34 element feature vector was reduced to 15 features. Fig. 2 shows graphically the correlation between the original set of 34 features. The features with the best discriminatory power were the three low magnification features described earlier and 12 nuclear features such as perimeter of a nucleus, convexity, x-centroid of the cell, nuclei orientation, its vertical projection, the  $\varphi_3$  momentum feature, histogram mean, energy, textural homogeneity, red channel histogram mean, skew and width.

In [51] the authors did a comparative study of the discriminatory power of the low magnification features against

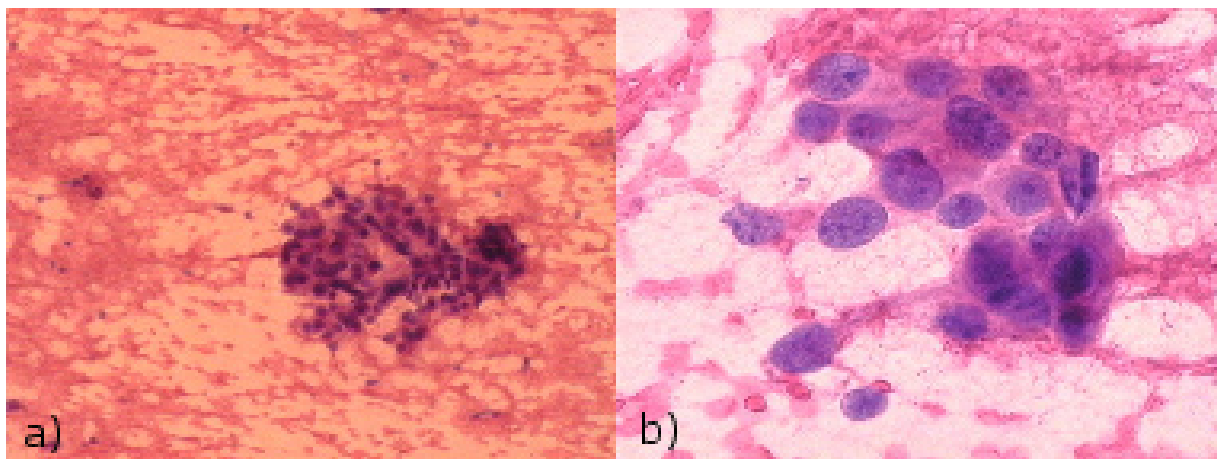


Figure 1: FNA images: a) 100 x resolution; b) 400 x resolution.



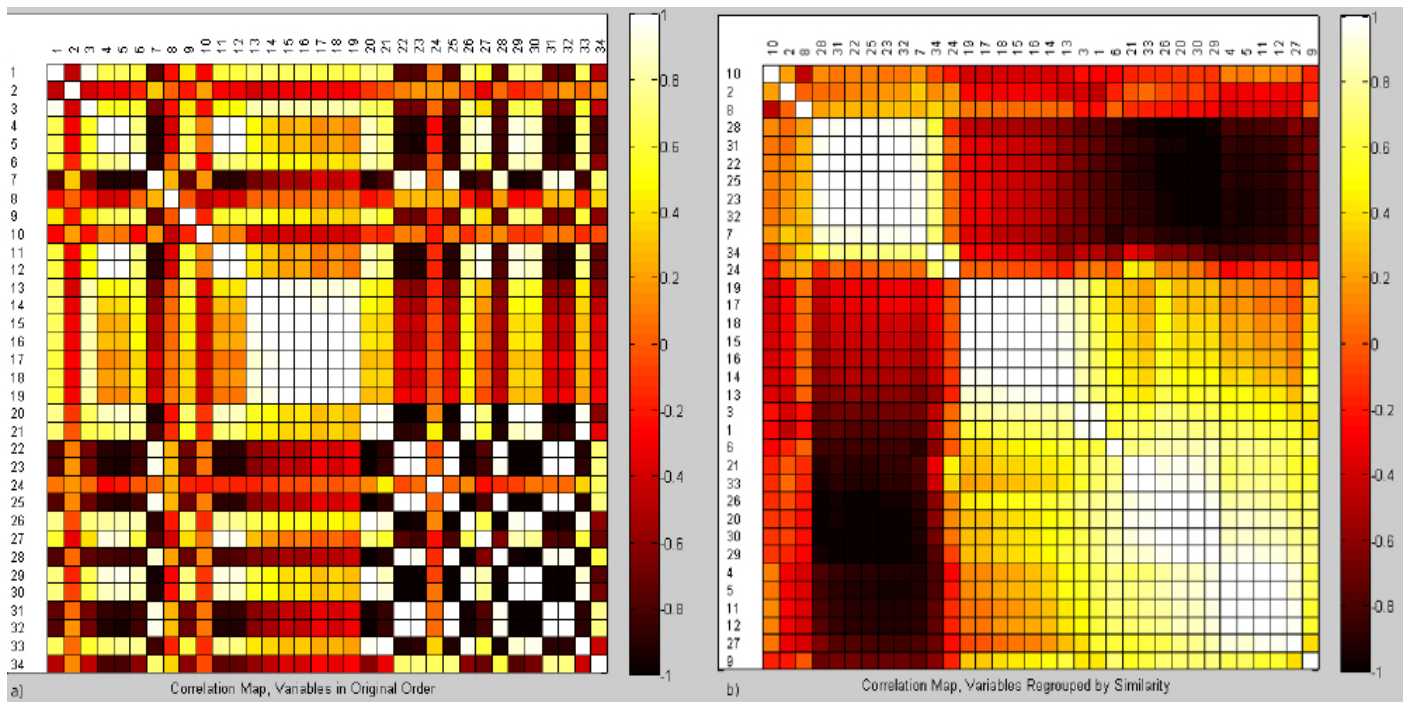


Figure 2: Correlation between extracted features: a) with variables in original order; b) with variables regrouped by similarity.

the features based on the cell nucleus. From their study, one can notice that on average low magnification features perform better but the best classification was recorded for a feature vector that consisted of both types of features. In [53] the authors showed that the best classification was achieved for the multilayer perceptron when the fuzzy c-means segmentation was used. On average, for most tested classifiers, the best classifications were obtained when the level set segmentation was used.

The described work done by Jeleń *et al.* was applied to a classification system built and currently being tested in the pathological laboratory. In [54] the authors show that preliminary medical tests provide promising results and the automated breast cancer grading system performs with a high accuracy when applied to the real and unseen data. The achieved accuracy was 81.96%.

### 3. Comparison of the Breast Cancer Malignancy Classification

In this paper we present a comparative study of the classification performance of the multilayer perceptron, as described by Jeleń, and three other types of neural networks. The tested networks include modular neural networks [55], radial basis function networks [56] and recurrent neural networks [57]. Modular networks make use of several multilayer perceptrons in parallel to process the input signals. The results obtained by all of the MLPs is then recombined to provide the final answer of the network. Because not all of the layers are interconnected and therefore less weights needs to be recalculated, the training process of these networks is reduced. The radial basis function (RBF) networks are, in fact, nonlinear hybrid networks. They are built with one hidden layer that uses the gaussian transfer function. The recurrent neural networks are constructed in

such a way that each hidden layer consists of the feedback loop to itself. This feedback allows for the determination of the relationships in time as well as through the input space [57].

For the purpose of this study, four neural networks described above were used and their classification accuracy was compared. The classification results are summarized in the Tab. 1. For test purposes a reduced set of features was used, as proposed by Jeleń in [48]. The described classifiers were applied to Jeleń's database to maintain the significance of the results. Additionally, a 10-fold cross-validation method was used to partition the data into ten subsets. One of these subsets was retained for testing and the remaining 9 were used for training. The overall error is calculated as an average error of all 10 tests.

Table 1: Classification error rates obtained with cross-validation.

Test No.	MLP	Modular NN	RBF NN	
1	17.01	20.35	22.30	11.62
2	41.65	31.30	15.14	33.71
3	4.78	11.20	12.14	17.29
4	13.11	24.88	14.35	23.20
5	6.32	9.32	18.79	23.83
6	5.84	18.85	32.27	11.06
7	2.44	1.36	2.42	15.72
8	3.33	2.58	23.80	33.32
9	20.37	12.40	25.93	23.17
10	19.97	17.84	27.95	25.28
Avg.	13.48	15.01	19.51	21.82

Classification results summarized in Tab. 1 show the performance of the tested classifiers. It can easily be noticed that the multilayer perceptron provides the best classification accuracy. The best performance from the newly proposed neural networks was noticed for modular networks which consists of several MLPs in parallel. It can also be noticed that the addition of the recurrent loop did not provide us with better results and overall achieved the highest error rate of all tested neural networks.



#### 4. Conclusions

The objective of this study was to compare the performance of other than multilayer perceptron neural networks. From the results presented in sec. 5 one can notice that the proposed neural networks did not achieve better accuracy than MLP. This brings the conclusion that for breast cancer grading the more complicated structure of the network does not improve the classification. In sec. 4 it was mentioned that the system based on the multilayer perceptron is currently tested and so far its accuracy is 81.96 %. Looking at the Tab. 1 it can be noticed that the accuracy of modular networks was 84.99 %. Comparing this two accuracy rates allows to draw the conclusion that it is worth to test the performans of these network on the real data and see how the accuracy of the classification will change.

#### References (Literatura)

- [1] Duda, R., Hart, P., and Stork, D. (2000) *Pattern Classification*. Wiley Interscience Publishers, 2nd ed.
- [2] Cheng, H., Shi, X., Min, R., Cai, X., and H.N., D. (2006) Approaches for Automated Detection and Classification of Masses in Mammograms. *Pattern Recognition*, 39(4), 646-668.
- [3] Bottema, M. and Slavotinek, J. (2000) Detection and Classification of Lobular and DCIS (small cell) Microcalcifications in Digital Mammograms . *Pattern Recognition Letters*, 21(13-14), 1209-1214.
- [4] Cheng, H. and Cui, M. (2004) Mass Lesion Detection with a Fuzzy Neural Network. *Pattern Recognition*, 37, 1189-1200.
- [5] Cheng, H., Wang, J., and Shi, X. (2004) Microcalcification Detection using Fuzzy Logic and Scale Space Approaches. *Pattern Recognition*, 37(2), 363-375.
- [6] De Santo, M., Molinara, M., Tortorella, F., and Vento, M. (2003) Automatic Classification of Clustered Microcalcifications by a Multiple Expert System . *Pattern Recognition*, 36(7), 1467-1477.
- [7] Grohman, W. and Dhawan, A. (2001) Fuzzy Convex Set-based Pattern Classification for Analysis of Mammographic Microcalcifications. *Pattern Recognition*, 34(7), 1469-1482.
- [8] Zhang, P., Verma, B., and Kumar, K. (2005) Neural vs. Statistical Classifier in Conjunction with Genetic Algorithm Based Feature Selection. *Pattern Recognition Letters*, 26(7), 909-919.
- [9] Wolberg, W. and Mangasarian, O. (1990) Multisurface Method of Pattern Separation for Medical Diagnosis Applied to Breast Cytology. *Proceedings of National Academy of Science, USA*, 87, 9193-9196.
- [10] Mangasarian, O., Setiono, R., and Wolberg, W. (1990) Pattern Recognition via Linear Programming: Theory and Application to Medical Diagnosis. *Large-Scale Num. Opt., Philadelphia:SIAM*, pp.22-31.
- [11] Street, W. N., Wolberg, W. H., and Mangasarian, O. L. (1993) Nuclear Feature Extraction for Breast Tumor Diagnosis. *Imaging Science and Technology/Society of Photographic Instrumentation Engineers 1993 International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*, San Jose, California, vol. 1905, pp. 861-870.
- [12] Street, N. (1994) *Cancer Diagnosis and Prognosis via Linear-Programming-Based Machine Learning*. Ph.D. thesis, University of Wisconsin.
- [13] Lee, K. and Street, W. (1999) A Fast and Robust Approach for Automated Segmentation of Breast Cancer Nuclei. *Proceedings of the Second IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging*, Palm Springs, CA, pp. 42-47.
- [14] Lee, K. and Street, W. (2003) Model-based Detection, Segmentation and Classification for Image Analysis using On-line Shape Learning. *Machine Vision and Applications*, 13(4), 222-233.
- [15] Wolberg, W. H., Street, W. N., and Mangasarian, O. L. (1993) Breast Cytology Diagnosis Via Digital Image Analysis. *Analytical and Quantitative Cytology and Histology*, 15, 396-404.
- [16] Wolberg, W. H., Street, W. N., and Mangasarian, O. L. (1994) Machine Learning Techniques to Diagnose Breast Cancer from Image-Processed Nuclear Features of Fine Needle Aspirates. *Cancer Letters*, 77, 163-171.
- [17] Walker, H. J., Albertelli, L., Titkov, Y., Kaltsatis, P., and Seburyano, G. (1998) Evolution of Neural Networks for the Detection of Breast Cancer. *Proceedings of International Joint Symposia on Intelligence and Systems*, pp. 34-40.
- [18] Walker, H. J. and Albertelli, L. (1998) Breast Cancer Screening Using Evolved Neural Networks. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2, 1619-1624.
- [19] Nezafat, R., Tabesh, A., Akhavan, S., Lucas, C., and Zia, M. (1998) Feature Selection and Classification for Diagnosing Breast Cancer. *Proceedings of International Association of Science and Technology for Development International Conference*, pp. 310-313.
- [20] Estevez, J., Alayon, S., and Moreno, L. (2002) Cytological Breast Cancer Fine Needle Aspirate Images Analysis with a Genetic Fuzzy Finite State Machine. *Conference Board of the Mathematical Sciences, CBMS 2002*, pp. 21-26.
- [21] Bagui, S., Bagui, S., Pal, K., and Pal, N. (2003) Breast Cancer Detection using Rank Nearest Neighbor Classification Rules. *Pattern Recognition*, 36(1), 25-34.
- [22] Weyn, B., van de Wouwer, G., van Daele, A., Scheunders, P., van Dyck, D., van Marck, E., and Jakob, W. (1998) Automated Breast Tumor Diagnosis and Grading Based on Wavelet Chromatin Texture Description. *Cytometry*, 33, 32-40.
- [23] Schnorrenberg, F., Pattichis, C., Kyriacou, K., and Schizas, C. (1994) Detection of Cell Nuclei in Breast Cancer Biopsies using Receptive Fields. *IEEE Proceedings of Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 649-650.
- [24] Schnorrenberg, F., Pattichis, C., Kyriacou, K., and Schizas, C. (1996) Content-based Description of Breast

- Cancer Biopsy Slides. Proc. Intl. EuroPACS Mtg., pp. 136-140.
- [25] Schnorrenberg, F., Pattichis, C., Kyriacou, K., Vassiliou, M., and Schizas, C. (1996) Computer-aided Classification of Breast Cancer Nuclei. *Technology & Health Care*, 4(2), 147-161.
- [26] Schnorrenberg, F., Tsapatsoulis, N., Pattichis, C., Schizas, C., Kollias, S., Vassiliou, M., Adamou, A., and Kyriacou, K. (2000) A modular neural network system for the analysis of nuclei in histopathological sections. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 19, 48-63.
- [27] Belhomme, P., Elmoataz, A., Herlin, P., and Bloyet, D. (1997) Generalized region growing operator with optimal scanning: application to segmentation of breast cancer images. *Journal of Microscopy*, 186, 41-50.
- [28] Adams, R. and Bischof, L. (1994) Seeded region growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16, 641-647.
- [29] Beucher, S. (1990) Segmentation d'images et morphologie mathématique. Ph.D. thesis, Ecole National Supérieur des Mines de Paris.
- [30] Beucher, S. and Meyer, F. (1992) *Mathematical Morphology in Image Processing*, Chapter 12. Marcel Dekker, New York, pp. 433-481.
- [31] Lezoray, O., Elmoataz, A., Cardot, H., Gougeon, G., Lecluse, M., and Revenu, M. (1998) Segmentation of cytological images using color and mathematical morphology. *European Conference on Stereology*, Amsterdam, Netherlands, p. 52.
- [32] Schüpp, S., Elmoataz, A., Fadili, J., Herlin, P., and Bloyet, D. (2000) Image segmentation via multiple active contour models and fuzzy clustering with biomedical applications. *The 15th International Conference on Pattern Recognition, ICPR'00, Barcelona, Spain*, vol. 1, pp. 622-625.
- [33] Bloom, H. and Richardson, W. (1957) Histological Grading and Prognosis in Breast Cancer. *British Journal of Cancer*, 11, 359-377.
- [34] Mangasarian, O., Street, W., and Wolberg, W. (1994) Breast Cancer Diagnosis and Prognosis via Linear Programming. *Operations Research*, 43(4), 570-576.
- [35] Cheng, H., Li, X., Riordan, D., and J.N., S. (1991) A Parallel Approach to Tubule Grading in Breast Cancer Lesions and its VLSI Implementation. *Fourth Annual IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, pp. 322-329.
- [36] Cheng, H., Wu, C., and Hung, D. (1998) VLSI for Moment Computation and its Application to Breast Cancer Detection. *Pattern Recognition*, 31(8), 1391-1406.
- [37] MacAulay, M., Scrimger, J., Riordan, D., and Cheng, H. (1991) An Interactive Graphics Package with Standard Examples of the Bloom and Richardson Histological Grading Technique. *Fourth Annual IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, pp. 108-112.
- [38] Gurevich, I. and Murashov, D. (2004) Method for early diagnostics of lymphatic system tumors on the basis of the analysis of chromatin constitution in cell nucleus images. *The 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR'04, Cambridge, UK*, pp. 806-809.
- [39] Florack, L. and Kuijper, A. (2000) The topological structure of scale-space images. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 12(1), 65-80.
- [40] Rodenacker, K. (1993) Applications of topology for evaluating pictorial structures. *Theoretical Foundations of Computer Vision*, Akademie-Verlag, Berlin, pp. 35-46.
- [41] Rodenacker, K. (1995) Quantitative microscope image analysis for improved diagnosis and prognosis of tumors in pathology. *Creaso Info Medical Imaging*, Creaso GmbH, Gilching, 22.
- [42] Rodenacker, K. and Bengtsson, E. (2003) A feature set for cytometry on digitized microscopic images. *Anal Cell Pathol*, 25(1), 1-36.
- [43] Weyn, B., Van de Wouwer, G., Koprowski, M., and et al. (1999) Value of morphometry, texture analysis, densitometry and histometry in the differential diagnosis and prognosis of malignant mesothelioma. *Journal of Pathology*, 4(189), 581-589.
- [44] Young, I., Verbeek, P., and Mayall, B. (1986) Characterization of chromatin distribution in cell nuclei. *Cytometry*, 7(5), 467-474.
- [45] Gurevich, I., Kharazishvili, D., Murashov, D., Salvetti, O., and Vorobjev, I. (2006) Technology for automated morphologic analysis of cytological slides. methods and results. *The 18th International Conference on Pattern Recognition, ICPR'06, Hong Kong, China*, pp. 711-714.
- [46] Churakova, Z., Gurevich, I., Jernova, I., and et al. (2003) Selection of diagnostically valuable features for morphological analysis of blood cells. *Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications*, 13(2), 381-383.
- [47] QinetiQ (2005) Automated Histopathology Breast Cancer Analysis and Diagnosis System. Data Sheet, <http://www.qinetiq.com/>.
- [48] Jeleń, Ł. (2009) Computerized Cancer Malignancy Grading of Fine Needle Aspirates. Ph.D. thesis, Concordia University.
- [49] Naik, S., Doyle, S., Agner, S., Madabhushi, A., Feldman, M., and Tomaszewski, J. (2008) Automated gland and nuclei segmentation for grading of prostate and breast cancer histopathology. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Biomedical Imaging*, pp. 284-287.
- [50] Jeleń, Ł., Fevens, T., and Krzyżak, A. (2008) Classification of breast cancer malignancy using cytological images of fine needle aspiration biopsies. *Int. J. Math. Comput. Sci.*, 18, 75-83.
- [51] Jeleń, Ł., Krzyżak, A., and Fevens, T. (2008) Comparison of pleomorphic and structural features used for breast cancer malignancy classification. *Lecture Notes in Computer Science, Advances in Artificial Intelligence*, 5032/2008, 138-149.
- [52] Jeleń, Ł., Fevens, T., Krzyżak, A., and Jeleń, M. (2008) Discriminatory power of cells grouping features for breast cancer malignancy classification. *Proceedings of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, vol. 21(3), pp. 559-562, Springer Berlin/Heidelberg.

- [53] Jeleń, Ł., Fevens, T., and Krzyżak, A. (2009) Influence of nuclei segmentation on breast cancer malignancy classification. *Proceedings of SPIE*, vol. 7260, pp. 726014-726014-9.
- [54] Jeleń, Ł., Lipiński, A., Detyna, J., and Jeleń, M. (2010) Clinical verification of computerized breast cancer malignancy grading. *Bio-Algorithms and Med-Systems*, 6 No. 12 Suppl. 1, 81-82.
- [55] Cofiño, A.S., José, M., Gutiérrez (2001) Optimal Modular Feedforward Neural Nets based on Functional Network Architectures. *Lecture Notes in Computer Science*, 2084, 308-315.
- [56] Park, J., Sandberg, I.W. (1991) Universal Approximation Using Radial-Basis-Function Networks. *Neural Computing*, 3(2), 246-257
- [57] Williams, R., Zipser, D. (1989) A learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks. *Neural Computation*, Vol. 1, 270-280

## System ekspertowy a dobór kadr w przedsiębiorstwie

### Część A: Koncepcja

*The Expert System vs the Staff Selection*  
*Part A: Concept of the System*

**Karolina Plawgo<sup>1</sup>, Marian Czerwiński<sup>1</sup>**

**Treść.** Publikacja odnosi się do istotnego procesu jakim jest dobór kadry, gdyż dotyczy on najważniejszego komponentu organizacji jakim jest człowiek. W publikacji zaproponowano metodę doboru kadry, wykorzystującą system ekspertowy szkieletowy opisany przez Antoniego Niederlińskiego. Zaproponowany podział kadry jak również zaprojektowany system ekspertowy oraz zastosowane reguły i odpowiadające im współczynniki pewności są przykładem podejścia do problemu doboru kadr.

**Słowa kluczowe:** systemy ekspertowe, skorupowe systemy ekspertowe, dobór kadr w przedsiębiorstwie, wspomaganie podejmowania decyzji, decyzje kadrowe.

**Abstract.** The publication refers to an essential process of staff selection, because it concerns a human being - the most important company's component. In this publication we proposed a staff selection method which uses a shell expert system proposed by Antoni Niederliński. The proposed division of a staff as well as the designed expert system and the applied rules with corresponding certainty factors re an example of the approach to the staff selection problem.

**Keywords:** expert systems, shell expert systems, staff selection in an enterprise, supporting decision making, staff decisions.

## 1. Wprowadzenie

W części A publikacji odnosimy się do istotnego procesu jakim jest dobór kadry, gdyż dotyczy on najważniejszego komponentu organizacji jakim jest człowiek. Decyzje personalne są dla firmy decyzjami kluczowymi, gdyż mają poważne następstwa w dalszym horyzoncie czasowym. Warto zwrócić uwagę, iż w razie komplikowania się warunków funkcjonowania organizacji i dużej turbulencji otoczenia, właściwy dobór pracowników może przyczynić się do zmniejszenia niepewności w działaniu firmy, stając się fundamentem jej przetrwania i rozwoju. Znane są przykłady uzdrawiania podupadających przedsiębiorstw przez zmianę kierownictwa lub doprowadzania do upadku dobrze prosperujących firm z powodu błędnych decyzji personalnych [2].

## 2. Informacje na temat doboru kadry wykorzystane do konstrukcji systemu ekspertowego

### 2.1. Przegląd wybranych technik selekcji

Podstawowym kryterium decyzyjnym w procesie zatrudniania nowego pracownika jest przewidywana użyteczność kandydata w przyszłości na określonym

stanowisku w konkretnym przedsiębiorstwie.

W poszukiwaniu informacji niezbędnych do postawienia prognozy o przyszłej skuteczności kandydata, przyjmuje się założenie, iż charakterystyka przeszłych i obecnych jego właściwości wyznacza zarazem jego ewentualną przyszłość w danym przedsiębiorstwie. Wykrycie tego typu właściwości jest zasadniczym celem wszystkich metod selekcji [3].

Użyteczność kandydata zależy zawsze od bardzo wielu czynników, z których na ogół żaden nie ma decydującego znaczenia. Dlatego też przy podejmowaniu decyzji o przyjęciu lub odrzuceniu zgłoszenia są często popełniane błędy, a ich minimalizacja jest głównym celem nowoczesnych procedur selekcyjnych [4].

Każda procedura lub informacja zmniejszająca statystyczny błąd przewidywania wartości przyjmowanych przez elementy jakiegoś zbioru jest nazywana predykatorem tych wartości.

Przygotowanie użytecznych predyktorów jest zwykle trudne, kosztowne, czasochłonne i pracochłonne. Powinny one spełniać twarde warunki, których sprawdzenie jest możliwe tylko na drodze empirycznej.

Zasadnicze warunki jakości predyktorów są określane w następujący sposób [6]:

1. Predyktor powinien być obiektywny, czyli osoba używająca predyktora nie może mieć wpływu ani na prognozę, ani na sposób jej spełnienia.

<sup>1</sup> Wrocławska Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej we Wrocławiu



2. Predyktor powinien być wystandaryzowany, czyli każdorazowo używany w taki sam sposób.
3. Predyktor powinien być rzetelny, czyli zapewniać powtarzalne wyniki.
4. Predyktor powinien być trafny, czyli wykazywać empirycznie udokumentowany związek ze zjawiskiem, do przewidywania którego służy.
5. Predyktor powinien mieć moc dyskryminacyjną, czyli różnicować zarówno fakty służące do przewidywania, jak i do oceny stopnia spełnienia prognozy.
6. Predyktor powinien być znormalizowany, czyli określać, jak fakt służący do przewidywania ma się do innych podobnych faktów.

Procedura i techniki wykorzystywane w procesie selekcji kadr różnią się dość znacznie, w zależności od wielkości firmy, tradycji, rodzaju stanowiska, trudności rekrutacji i wielu innych czynników.

Istnieją dwie podstawowe zmienne uwzględniane w wyborze technik selekcji. Pierwszym kryterium jest przydatność, w sensie znaczenia danej techniki dla doboru pracownika, oraz koszt, jaki ponosi organizacja przy jej zastosowaniu [7].

Najbardziej wiarygodną ocenę kandydata można uzyskać za pomocą techniki (a raczej zbioru technik) assessment center oraz konkursu, lecz są one najkosztowniejsze. Porównywalne wyniki można uzyskać przy pomocy systemu ekspertowego, przy znacznie niższych nakładach finansowych [22].

Pierwszych informacji o kandydacie do pracy dostarczają na ogół złożone przez niego dokumenty. Należą do nich indywidualnie zaprojektowane życiorysy i podania o przyjęcie do pracy. Kwestionariusze przygotowane przez przedsiębiorstwo przynoszą więcej uporządkowanych informacji o innych elementach dotychczasowego życia kandydata.

Do początkowych sposobów zdobywania informacji o kandydacie należą także bezpośrednie rozmowy o nim samym, zwane wywiadem. Wywiad może mieć postać zupełnie swobodnej i nie przygotowanej uprzednio rozmowy (wywiad swobodny), może składać się z przygotowanych wcześniej i zadawanych wszystkim kandydatom pytań (wywiad ustrukturalizowany) oraz może zawierać pytania i problemy, z którymi kandydat zetknie się już na konkretnym miejscu pracy (wywiad sytuacyjny) [8].

Spotykana czasami formą zdobywania informacji o kandydacie do pracy jest zasięgnięcie o nim opinii przez samo przedsiębiorstwo. Wprawdzie kandydat często przedkłada z własnej inicjatywy lub na żądanie pisemne opinie o sobie, ale panuje przekonanie, że jeżeli ma do nich wgląd, to są one mało użyteczne, najczęściej niekompletne, pomijają jego negatywne właściwości i przesadnie uwypuklają zalety [14].

Dla wyrobienia sobie poglądu o przydatności kandydata można zlecić mu pokazowe wykonanie wybranych zadań z zakresu jego przyszłej pracy. Jest to celowe, gdy kandydat deklaruje uprzednie doświadczenie w pracy tego typu. Metodę tę się nazywa testowaniem na próbkach pracy i

służy ona do oceny nabytej umiejętności i biegłości [5].

Ocenę zdolności, czyli potencjalnej sprawności w wykonywaniu nowych dla kandydata zadań, przeprowadza się przy pomocy testów psychologicznych. Przygotowanie rzetelnych i trafnych testów jest bardzo kosztowne.

Z kolei testy osobowości służą wyłącznie do różnicowania ludzi pod względem jakiejś właściwości uznanej za ważną.

Należy pamiętać, iż prawdopodobieństwo wyłonienia za pomocą metody losowej więcej niż przeciętnego uczestnika szacuje się na około 15%, za pomocą innych metod - 35% (wyłączając konkurs i assessment center), a za pomocą systemu ekspertowego na około 70%.

Omówiony w pracy system ekspertowy służy właśnie wspomaganie procesu selekcji zgłoszeń kandydatów na wakujące stanowisko.

Przez selekcję rozumie się zbiór czynności zmierzających do wyboru najodpowiedniejszej osoby. Czynności te obejmują mierzenie i ocenę cech kandydatów (z punktu widzenia wymagań stanowiska), które rokują największą nadzieję na uzyskanie powodzenia.

Ten spośród kandydatów powinien zostać wybrany, którego cechy najbardziej przystają do ustalonych wymagań, a zarazem mieszczą się w dopuszczalnym przedziale. Dolna granica tego przedziału oznacza minimalny próg, który kandydat musi przekroczyć, gdyż w przeciwnym razie powołanie go na wolne stanowisko oznaczałoby zatrudnienie pracownika niekompetentnego. Wyjście zaś poza górny pułap świadczyłoby o tylko częściowym wykorzystaniu możliwości kandydata [20].

Wybierając narzędzie, które będzie wspomagać proces doboru pracowników, braliśmy pod uwagę fakt, iż należy preferować tę technikę selekcji, która minimalizuje wpływ czynników subiektywnych, ponieważ ocena kandydata nie może zależeć od tego, kto dokonuje selekcji. Zaprojektowany przez nas system ekspertowy w dość znacznym stopniu spełnia ten warunek, gdyż całkowite usunięcie czynnika subiektywnego w doborze jest oczywiście niemożliwe. Dzięki temu podejściu, wyeliminowane zostały niektóre ze słabych stron tradycyjnych technik selekcji. Chodzi tu między innymi o tak zwany „efekt trąbki”, który dotyczy sytuacji, w której słaba ocena jakiejś jednej cechy kandydata wpływa na ocenę wszystkich innych jego cech lub też o tworzenie stereotypów, czyli kierowanie się tzw. pierwszym wrażeniem [16].

Z przedstawionych dotychczas informacji wynika wyraźnie, że wiele czynności niezbędnych do selekcjonowania pracowników musi być przekazanych specjalistom, lub proces ten powinien być wspomagany specjalnie do tego celu skonstruowanymi systemami, gdyż przeciętnie menedżer nie jest w stanie opanować niezbędnej wiedzy, ani zdobyć pożądanej biegłości w jej stosowaniu [19].

## 2.2. Podział zbiorowości menedżerskiej

Menedżerowie w danej organizacji różnią się zajmowaną

pozycją (szczeblem władzy), stosunkiem do powierzonych im zasobów, sposobem podejścia do problemów, a także obszarem działania w przedsiębiorstwie.

Punktem wyjścia przy konstrukcji bazy wiedzy był dla nas podział kadry ze względu na miejsce w hierarchii organizacyjnej. Jest to podstawowe kryterium podziału kadry i z tego punktu widzenia można wyróżnić kadrę naczelną, kadrę średniego szczebla oraz kadrę niższego szczebla zarządzania [9].

1. Zasadniczym zadaniem **kierownictwa naczelnego** jest planowanie strategiczne i podejmowanie decyzji o takim też charakterze. Stanowią oni część kadry kierowniczej, która ustala cele i misję organizacji, jej ogólną strategię oraz politykę operacyjną. Podejmują więc najważniejsze dla organizacji decyzje. Oficjalnie reprezentują oni przedsiębiorstwo w kontaktach zewnętrznych, ich praca jest złożona, ponoszą odpowiedzialność za funkcjonowanie i wyniki jakie osiąga kierowana przez nich organizacja. Posługują się tytułami: prezesa, wiceprezesa lub dyrektora naczelnego.
2. Natomiast **kierownicy średniego szczebla** sterują działaniami realizującymi politykę firmy (strategię przygotowaną przez menedżerów najwyższego szczebla organizacyjnego), mają oni obowiązek podejmować decyzje operacyjne, przekazywać je kadrze kierowniczej niższego szczebla i nadzorować ich realizację, równoważą wymagania przełożonych i możliwości wykonawcze podwładnych. Typowymi przykładami kierowników tego szczebla organizacyjnego są kierownicy: zakładów, wydziałów, filii, przedstawicielstw itp. Jest to bardzo zróżnicowana grupa menedżerów.
3. Z kolei zadaniem **niższej kadry kierowniczej** jest wdrożenie podjętych decyzji oraz bezpośrednie kierowanie procesem realizacji zadań. Nadzorują oni i koordynują działania pracowników wykonawczych oraz ponoszą odpowiedzialność za efekty ich pracy. Ich stanowiska są pierwszymi stanowiskami kierowniczymi pracowników awansowanych spośród personelu wykonawczego, którego pracę bezpośrednio nadzorują. Kierownicy ci noszą przeważnie tytuł brygadzysty, nadzorcy lub kierownika biura i często na ich określenie nie używa się pojęcia menedżer, lecz nadzorca lub kontroler.

Przyjmując za podstawę zróżnicowanie kierowników według stosunku do powierzonych i zarządzanych przez nich zasobów, można dokonać następującego podziału [15]:

1. **Entrepreneurowie.** Entrepreneur to przedsiębiorca, który zakłada firmę i kieruje nią na własny rachunek. Podejmuje on zazwyczaj ryzykowne przedsięwzięcie z nadzieją na osiągnięcie sukcesu. Przedsięwzięcie to polega na przenoszeniu różnych zasobów z obszarów o niskiej efektywności i małych zyskach do obszarów o wysokiej wydajności i wyższych zyskach.
2. **Intrapreneurowie.** Intrapreneur jest menedżerem mającym zdolność do kierowania firmą, wykazującym

się dużą inicjatywą i pomysłowością w działaniu, które ukierunkowane jest na rozwój firmy nie będącej jego własnością.

Obie kategorie menedżerów różnią się zasadniczo pod względem predyspozycji psychicznych – menedżerowie dzielą się na tych, którzy pragną zarządzać własną firmą, i tych, którzy wolą mieć pracodawców. Podstawowa różnica polega na tym, że w przypadku intrapreneurów potencjalne ryzyko i zyski są zwykle mniejsze niż w przypadku entrepreneurów. W Polsce wielu menedżerów występuje w roli entrepreneurów, prowadzących własne firmy i wykazujących wyobraźnię i twórcze uzdolnienia. Zróżnicowanie menedżerów według sposobu podejścia do problemów [21]:

1. **Menedżerowie wizjonerzy.** Charakteryzują się oni śmiałością, charyzmą, oryginalnością, często ekscentrycznością, błyskotliwością i bezkompromisowością. Menedżerowie wizjonerzy obdarzeni są intuicją, potrafią inspirować swoich zwolenników. W podejmowanych działaniach kierują się instynktem. Tacy menedżerowie często proponują całkowite zerwanie z przeszłością i wejście na nowe obszary gospodarki.
2. **Menedżerowie analitycy.** Są oni racjonalistami, rachmistrzami i kontrolerami, zajmującymi się liczbami i faktami, a nie opiniami. Widzą świat w barwach białych i czarnych i uważają, że na każde pytanie istnieje właściwa odpowiedź. Menedżerowie tego typu mają wspaniałe zdolności analityczne i umiejętność wykorzystywania systemów kontroli. Dzięki temu potrafią sprawować nadzór nad dużymi firmami.
3. **Menedżerowie wykonawcy.** Do tej grupy należą osoby pragmatyczne, odnoszące sukcesy w działaniu, wdrażaniu planów i rozwiązywaniu problemów. Podporządkowują ludzi swej woli i prowadzą ich pod własnym przywództwem do sukcesu. Efektywność ich działania wymaga uzupełnienia o wizję i analizę firmy.

Kolejny sposób różnicowania zbiorowości menedżerskiej oparty jest o podział według obszarów zarządzania [11]:

1. **Menedżerowie marketingu.** Są to osoby pracujące w dziedzinach związanych z funkcjami marketingu – badaniem rynku, pozyskiwaniem odbiorców na produkty i usługi organizacji, rozwojem nowych wyrobów, promocją i dystrybucją. Posiadanie przez organizację dobrych menedżerów marketingu może mieć decydujące znaczenie dla jej przetrwania i rozwoju.
2. **Menedżerowie finansów.** Kierownicy finansów zajmują się zasobami finansowymi organizacji. Odpowiadają za takie działania jak rachunkowość, zarządzanie zasobami pieniężnymi, inwestycje. Szczególnie istotne jest obecnie opanowanie przez nich zasad i instrumentów inżynierii finansowej, która pozwala na rozwiązywanie złożonych problemów strategicznych dzięki umiejętnemu rozłożeniu ryzyka.
3. **Menedżerowie eksploatacji (operacji).** Kierownicy

operacyjni zajmują się konstruowaniem systemów wytwarzających produkty i usługi organizacji oraz zarządzaniem nimi. Typowy zakres ich obowiązków obejmuje: badania, projektowanie, wytwarzanie, kontrolę produkcji, kontrolę jakości, wybór miejsca produkcji. Sterują oni dziedzinami, w których jest wymagane wyższe wykształcenie techniczne.

4. Menedżerowie zasobów ludzkich (menedżerowie personalni). Są to osoby wykonujące zadania w obrębie funkcji kadrowej lub kierujący pracą zespołu ludzi realizujących tę funkcję. Ich głównym zadaniem jest organizowanie łańcucha procesów składających się na gospodarowanie zasobami ludzkimi i stałe doskonalenie ich jakości. Najważniejszym obszarem ich działalności jest: planowanie zasobów ludzkich, rekrutacja i dobór pracowników, ich szkolenie i rozwój, projektowanie systemów wynagrodzeń oraz formułowanie ocen osiągniętych przez personel wyników, a także zwalnianie pracowników uzyskujących w swej pracy słabe rezultaty i nastrożających problemy. Menedżerowie zasobów ludzkich odpowiedzialni są za sprawy, których właściwe prowadzenie wymaga interdyscyplinarnej wiedzy, w szczególności znajomości zasad inżynierii społecznej.
5. Menedżerowie administracyjni. Kierownicy administracyjni, nazywani też menedżerami ogólnymi, nie są związani z jakąś określoną specjalnością kierowniczą. Powinni być oni wszechstronni, dysponować znajomością wszystkich dziedzin funkcjonalnych zarządzania i mieć wykształcenie prawnicze lub ekonomiczne oraz wykazywać dużą wrażliwość na kwestie etyczne i ekologiczne.
6. Pozostałe typy menedżerów. W wielu organizacjach występują wyspecjalizowane stanowiska kierownicze, które nie dają się zakwalifikować do któreś z opisanych grup. Na przykład menedżerowie do spraw public relations zajmują się stosunkami z opinią publiczną i środkami masowego przekazu, a ich zadaniem jest ochrona i poprawa publicznego wizerunku organizacji. Z kolei menedżerowie do spraw badań i rozwoju koordynują działania naukowców i inżynierów pracujących nad projektami badawczymi, liczebność i znaczenie takich menedżerów będzie się zwiększać wraz ze wzrostem rozmiarów i złożoności współczesnych organizacji.

Inny podział kadry menedżerskiej uwzględnia stopień powiązania z podstawowym rodzajem działalności firmy i zgodnie z tym kryterium wyróżnia się kierowników liniowych i kierowników funkcjonalnych [10].

Jeszcze inny, podstawowy podział obejmuje całą populację sfery zarządzającej, traktując ją jako menedżera łącznego, zarządzanie zaś jako proces podejmowania decyzji. Z tego względu można wyróżnić: personel pomocniczy, specjalistów oraz decydentów.

Co więcej, na różnych etapach rozwoju firm są potrzebni różni kierownicy i rozmaite style zarządzania.

Należy zaznaczyć, że poza wymienionymi istnieje jeszcze

wiele innych podziałów zbiorowości menedżerskiej, biorąc pod uwagę na przykład cechy demograficzne, preferowany styl kierowania, określone cechy osobowości.

Dla potrzeb zaprojektowanego przez nas systemu ekspertowego dotyczącego ewentualnego, właściwego umiejscowienia kandydata w hierarchii organizacyjnej przedsiębiorstwa, skoncentrujemy się na pierwszym zaproponowanym podziale uwzględniającym zróżnicowanie menedżerów według szczebla zarządzania.

### 2.3. Określenie kwalifikacji menedżerów według szczebli zarządzania

Nie ma zgody co do tego, jakie konkretne cechy i z jakim natężeniem składają się na obraz kierownika uniwersalnego. Dużo łatwiej jest określić właściwości kierownika usytuowanego na konkretnym stanowisku i działającego w określonych warunkach. Predyspozycje te muszą być powiązane nie tylko z bieżącymi potrzebami przedsiębiorstwa, ale przede wszystkim z jego długofalową strategią. Oczywiście każda organizacja może mieć indywidualne podejście do sposobu doboru kadry, stanowiące odbicie jej kultury organizacyjnej i odpowiadające własnym potrzebom. Określając preferowaną osobowość kandydata należy wziąć pod uwagę także cechy charakteru współpracowników, w sytuacji gdy będzie to stanowisko zależne [17].

Kwestią zasadniczą w tym momencie jest określenie zbioru wymagań wobec kierownika, osobistych warunków, niezbędnych na poszczególnych szczeblach zarządzania. Czyli zidentyfikowanie tych elementów kwalifikacji, które pozwolą osobie obsadzonej na danym stanowisku sprostać czekającym nań zadaniom, zapewniając satysfakcję z wykonywanego zawodu. Jedną z propozycji w tym względzie obejmuje trzy rodzaje kompetencji: techniczne, konceptualne i interpersonalne [18].

Kompetencje techniczne polegają na zdolności wykorzystania specjalistycznej wiedzy, metod albo technik w wykonywaniu pracy. Ten rodzaj umiejętności szczególnie jest ważny w przypadku kierowników niższego szczebla, którzy bezpośrednio nadzorują realizację zadań.

Przez kompetencje konceptualne rozumie się zdolność do obejmowania abstrakcyjnych albo ogólnych idei i wykorzystaniu ich w specyficznych sytuacjach, zdolność postrzegania kompleksowości organizacji i widzenia jej jako całości, a także oceniania szans i ich wykorzystania. Wyrażać się ona powinna w realizacji przedsięwzięć o złożonej strukturze i z udziałem różnorodnych jednostek organizacyjnych. Kwalifikacje konceptualne są szczególnie niezbędne dla kierownictwa naczelnego firmy.

Kompetencje interpersonalne pojmowane są jako zdolność rozumienia ludzi i wpływania na ich zachowania. Składają się na nie takie działania, jak: komunikowanie, przewodzenie i motywowanie. Umiejętności te są również ważne na wszystkich szczeblach zarządzania.



### 3. Podsumowanie

Omówiono w tej części podział kadry, natomiast w części B będzie zaprojektowany system ekspertowy oraz zastosowane reguły i odpowiadające im współczynniki pewności jako przykładem podejścia do problemu doboru kadr.

Przegląd wybranych pozycji literatury przedstawiony w tej publikacji wskazuje, iż autorów zajmujących się omawianą problematyką różni nie tylko terminologia, ale również rodzaje i liczebność elementów składowych, stopień zagregowania oraz hierarchia składowych. Brak wspomnianej zgodności świadczy zapewne o tym, że pojęcie doboru kadry nie utrzymało się jeszcze w terminologii naukowej i że jest to dziedzina rozwijająca się, co należy traktować jako optymistyczne zjawisko.

Problematyka roli i wymagań wobec kierownika może być ujmowana przynajmniej z trzech punktów widzenia, odpowiadających w przybliżeniu trzem podstawowym szkołom w nauce o organizacji i zarządzaniu. Pierwszy z nich nawiązuje do szkoły klasycznej, eksponując czynności bądź funkcje wykonywane przez kierownika, takich jak planowanie, organizowanie, motywowanie i kontrolowanie. Drugi mający swoją genezę w dorobku szkoły socjologicznej, postrzega kierownika przede wszystkim jako przywódcę mającego określone cechy osobowościowe oraz pełniące głównie funkcje motywowania. Trzeci zaś, właściwy systemowemu podejściu, traktuje kierownika jako decydenta, a jego pracę jako proces podejmowania decyzji [20].

Oczywiście każda organizacja powinna mieć indywidualne podejście do sposobu doboru kadry, stanowiące odbicie jej kultury organizacyjnej i odpowiadające własnym potrzebom, związanymi ze strategią firmy, strategią marketingową, produkcją, etapem rozwoju firmy, jej wielkością, branżą.

Jest zrozumiałe, iż szczególny wpływ na potrzeby kadrowe i przyszłe decyzje w tym zakresie mają cele, plany i strategię firmy. Na przykład rozwój firmy oraz różnicowanie obszarów działania będą wymagać doboru kadry ukierunkowanej na nowe domeny [12].

Istotny wpływ na procesy kadrowe ma również wielkość firmy.

Czynnikiem wartym dostrzeżenia jest też etap rozwoju organizacji, ma on znaczenie z punktu widzenia pożądanego typu osobowości menedżerów. Na przykład w okresie początkowym działalności firmy i wejścia na rynek jest wymagana osobowość o cechach przedsiębiorczych, podczas gdy w okresie normalnego, stabilnego funkcjonowania raczej menedżerowie o cechach biurokratycznych. W okresie starzenia się firmy strategia selekcji powinna polegać na poszukiwaniu menedżerów skłonnych do zdecydowanych, niekonwencjonalnych i niepopularnych działań, takich jak eliminowanie nierentownej działalności, zwolnienia niewydolnych pracowników [1].

Warto jeszcze wspomnieć o wpływie branży. Jest to czynnik, co do którego istnieją przeciwstawne opinie – od

takich, iż powinien on rozstrzygać o doborze na stanowisko nawet najwyższego szczebla, do takich, iż nie ma on istotnego znaczenia w tym zakresie. Jednakże kompetencje branżowe mają istotne znaczenie dla obsady stanowisk na niższych szczeblach zarządzania. W przypadku kierownictwa naczelnego znaczenie ich jest mniejsze, chociaż nadal ważne. Szczególnie takie dziedziny, jak: energetyka, przemysł chemiczny, górnictwo, wymagają gruntownej znajomości specyfiki branży na wszystkich szczeblach organizacyjnych [13].

Istotne znaczenie dla procesu doboru kadr mają cele i oczekiwania przyszłych pracowników, u których podstaw leżą ich potrzeby i wartości. Każda z zatrudniających się osób wnosi je do organizacji, gdzie wyrażają się w postawach i zachowaniach.

### Literatura (References)

- [1] Altmann H. Ch., *Strategie sukcesu*, Businessman Book, Warszawa 1997.
- [2] Biela A., *Wymiary decyzji menedżerskich*, Towarzystwo Naukowe KUL, Lublin 2001.
- [3] Borowska J., *Przygotowanie do rekrutacji*, Personel, 1998, 10, s. 1.
- [4] Cauvier D. L., *Jak zatrudnić odpowiednią osobę?*, Centrum Rozwoju Twórczego Przywództwa Sp. z o.o., Kłudzienko k. Warszawy 1996.
- [5] Daszkowski J., *Kierowanie ludźmi w organizacji; materiały pomocnicze do wykładu zarządzanie zasobami pracy w przedsiębiorstwie*, Szkoła Główna Handlowa, Warszawa 2000.
- [6] De Bono E., *Myślenie równoległe*, PRIMA, Warszawa 1998.
- [7] Gajos L., *Oceny okresowe – problemy etyczne*, Personel, 1998, 3, 48.
- [8] Gensing L., *Jak rekrutować pracowników: odszukaj, wybierz i zatrudnij właściwych ludzi. Przewodnik dla małych i średnich firm*, M and A Communications Polska, Lublin 1995.
- [9] Griffin R. W., *Podstawy zarządzania organizacjami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [10] Haber L. H., *Management. Zarys zarządzania małą firmą*, Wydawnictwo Profesjonalnej Szkoły Biznesu, Kraków 1998.
- [11] Hesselbein F. [et al], *Organizacja przyszłości*, Business Press, Warszawa 1998.
- [12] Jarmuż S., *Wielka piątka*, Personel, 1998, 3.
- [13] Koch R., *Strategia. Jak opanować i wprowadzić w życie najskuteczniejszą strategię*, Wydawnictwo Profesjonalnej Szkoły Biznesu, Kraków 1998.
- [14] Kopeć J., *System oceniania pracowników jako narzędzie zarządzania zasobami ludzkimi w przedsiębiorstwie, praca doktorska*, AE Kraków, 1998.
- [15] Listwan T., *Kształtowanie Kadry menedżerskiej firmy*, Wydawnictwo Mimex, Wrocław 1993.
- [16] Nogalski B., Śniadecki J., *Kształtowanie umiejętności menedżerskich*, Towarzystwo Naukowe Organizacji



i Kierownictwa: Ośrodek Postępu Organizacyjnego, Bydgoszcz 1998.

[17] Ochnikowska D., *Optymistyczna organizacja; jak trafnie dobierać personel*, Personel, 1998, 3.

[18] Penc J., *Decyzje menedżerskie – o sztuce zarządzania*, Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa 2001.

[19] Pokorska B., *Wybór najlepszych*, Marketing w praktyce, 1996, 9/10.

[20] Pruchniak R., *W poszukiwaniu ideału; jak zorganizować proces rekrutacji*, Personel, 1998, 7/8, 52-53.

[21] Różański M., *Jak znaleźć dobrego pracownika*, Pieniądz, 2000, 6.

[22] Scheer A.W., *Business Process Engineering*, Springer-Verlag, Berlin 1994.

## Zastosowanie fuzji klasyfikatorów rozmytych i genetycznych w zadaniu sterowania sygnalizacją świetlną

*Application of Mergers and Genetic Fuzzy  
Classifiers in the Task of Controlling Traffic Lights*

**Katarzyna Topolska<sup>1,2</sup>, Mariusz Topolski<sup>2</sup>,  
Bartłomiej Błachut<sup>2</sup>, Marcin Haber<sup>2</sup>, Arkadiusz Piekarz<sup>2</sup>**

**Treść:** Artykuł prezentuje problematykę sterowania ruchem pojazdów w obrębie jednego skrzyżowania z zastosowaniem metod klasycznych, tradycyjnych i algorytmów genetycznych połączonych z klasyfikatorem rozmytym. Autorzy wykonując badania wskazali, że operatory genetyczne z klasyfikatorem rozmytym pozwalają o około 13% sprawniej sterować sygnalizacją świetlną niż metody klasyczne i o około 33% lepiej niż metody tradycyjne. Metody klasyczne zostały zdefiniowane jako modele bazujące tylko na czujnikach ruchu i na zasadzie kolejki fifo, a metoda tradycyjna to standardowe stałe cykle świetlne.

**Słowa kluczowe:** logika rozmyta, sterowanie sygnalizacją świetlną, algorytmy genetyczne.

**Abstract:** The article presents issues of the traffic guidance within one intersection with the application of classical and traditional methods along with genetic algorithms connected with the fuzzy classifier. Results presented by the authors show that genetic operators with the fuzzy classifier allow to control the traffic lights about 13% more efficiently than classic methods and about about 33% better than traditional methods. Classic methods were defined as models based only on movement sensors and on the principle of the FIFO queues, a traditional method is a standard permanent light cycles.

**Keywords:** fuzzu logic, traffic light control, genetic algorithms.

### 1. Wstęp

W artykule skupiono się głównie na prezentacji modelu sterowania sygnalizacją świetlną w obrębie wybranego skrzyżowania z wykorzystaniem fuzji operatorów genetycznych z klasyfikatorem rozmytym. Najważniejszym elementem, który usprawnia sterowanie ruchem drogowym jest - a w zasadzie są - sygnalizacje świetlne. Wyznaczane przez nie czasy przejazdu, postoju w znacznym stopniu wpływają na przebieg ruchu drogowego, a także na stopień wydzielania się w centrach miast szkodliwych substancji. Zbyt ograniczony ruch w obrębie skrzyżowań wywiera również wpływ na ekonomikę i organizację transportu miejskiego [2].

Początek ich rozwoju przypada na rok 1868, kiedy to w Londynie na skrzyżowaniu *New Palace Yard* i *Bridge Street* postawiono jeden z pierwszych sygnalizatorów. Były to urządzenia ręcznie sterowane, które wyposażone w lampę gazową wysyłały zielone bądź czerwone światło. Niestety, kilka dni po eksplozji tego urządzenia zaprzestano jego stosowania.

Ponowne próby wdrożenia urządzenia, które sterowałoby ruchem drogowym miały miejsce jeszcze przed pierwszą

wojną światową w USA, gdzie zainstalowano pierwszą elektrycznie sterowaną sygnalizację świetlną. Kolejnym etapem było zastosowanie trójkolorowych świateł a niedługo po tym w roku 1928 zainstalowano pierwszy sygnalizator, który potrafił zarządzać ruchem na podstawie sygnału klaksonu. W Polsce pierwsza sygnalizacja świetlna pojawiła się w 1926 roku w Warszawie, jednak pierwsze sygnalizatory w pełni akomodacyjne w naszym kraju zostały wprowadzone w latach siedemdziesiątych. Obecnie z roku na rok coraz śmielej postępujący postęp technologiczny pozwala przyjąć wyzwanie, jakie niesie ze sobą rozłożenie znacznie większego natężenia ruchu drogowego niż tego za czasów lat siedemdziesiątych, osiemdziesiątych.

W zależności od sytuacji mamy do wyboru następujące rodzaje systemów sygnalizacyjnych: system cykliczny, system akomodacyjny oraz ich odmiany.

Wszystkie wartości poszczególnych składników możemy uzyskać przy pomocy odpowiednio przemyślanego modelu ruchu drogowego, gdyż nie istnieją jeszcze detektory pozwalające śledzić wszystkie zmiany zachodzące podczas przemieszczania się pojazdów.

Systemy sterujące ruchem drogowym, zaprojektowane

<sup>1</sup>Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu

<sup>2</sup>Wrocławska Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej we Wrocławiu (K. Topolska, M. Topolski - wykładowcy; B. Błachut, M. Haber, A. Piekarz - studenci).

właśnie w ten sposób, powinny dążyć do uzyskania jak najmniejszej wartości reprezentującej natężenie ruchu, które możemy łatwo obliczyć  $Q = v \cdot k$ , gdzie  $Q$  to natężenie ruchu wyrażone w [P/h],  $v$  – średnia prędkość pojazdów na określonym odcinku wyrażona w [km/h],  $k$  – gęstość ruchu wyrażona w [P/km]. Dla odpowiednio małego  $Q$  możemy osiągnąć satysfakcjonującą płynność ruchu, analogicznie dość duża wartość  $Q$  może oznaczać bardzo powolną jazdę pojazdów bądź ich całkowite zatrzymanie. Natężenie ruchu drogowego w znacznym stopniu zależy od tego jak zaprojektowane jest samo skrzyżowanie (np. od tego ile posiada pasów do jazdy prosto, skrzyżowania w lewo i prawo), a także od tego w jaki sposób działają światła znajdujące się w pobliżu naszego epicentrum ruchu, gdyż nie można dopuszczać do sytuacji, w której korek uliczny będzie tworzył się tuż za skrzyżowaniem z powodu zainstalowania cyklicznego systemu świateł znajdujących się za naszym skrzyżowaniem. Sytuacja taka może doprowadzić do tego, że stojąc w korku na skrzyżowaniu i widząc zielone światło, będziemy zmuszeni do dalszego stania w tym samym miejscu, z powodu braku miejsca na pasie, na który chcemy wjechać.

Jednym z pożądanych rezultatów, jakich się spodziewamy po inteligentnych systemach zarządzających sygnalizacją jest płynne, bardziej ekonomiczne przemieszczanie się pojazdów w zatłoczonych miejscach. Nie chcemy również doprowadzać do sytuacji, gdy na ulicy, którą nikt nie jedzie, będzie paliło się zielone światło a samochody z dróg prostopadłych będą niepotrzebnie czekały. Dlatego w nasze życie coraz częściej, czy tego chcemy czy nie, będziemy wdrażać systemy oparte na sztucznej inteligencji, m.in. na algorytmach ewolucyjnych, które świetnie nadają się do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych.

## 2. Optymalizacja zarządzania sygnalizacją świetlną

W części badawczej zadanie optymalizacji zarządzania sygnalizacją świetlną zrealizowano z wykorzystaniem autorskiej metody wywodzącej się z metodyki algorytmów genetycznych i zbiorów rozmytych. Autorem owych metod fuzji klasyfikatorów rozmytych z algorytmem genetycznym jest Katarzyna i Mariusz Topolscy. Pomysł zastosowania algorytmów genetycznych w czystej postaci jest autorstwa studentów ujętych w niniejszym artykule.

Stosując algorytmy genetyczne każdą czynność można przedstawić w postaci zadania, z kolei jego rozwiązanie można rozumieć jako szukania możliwie „najlepszego” rozwiązania w danej przestrzeni. W zależności od wielkości przestrzeni używa się różnych metod rozwiązania danego problemu. W przypadku małych przestrzeni klasyczne metody oparte na teorii probalistyki zwykle wystarczają. Większe przestrzenie wymagają zastosowania specjalistycznych metod sztucznej inteligencji, wśród których wyróżnić można algorytmy genetyczne.

Twórcą algorytmów genetycznych był John Holland. Inspiracją do powstania takiej metody jest ewolucja i gene-

tyka, a dokładniej procesy w nich zachodzące. Osobniki danej populacji są prawdopodobieństwem rozwiązania występującego problemu. Osobniki te poddawane są procesowi reprodukcji. Zmieszanie materiału genetycznego pochodzące od obojga z rodziców powoduje powstanie nowego pokolenia- potomstwa. W środowisku naturalnym szansę na przetrwanie mają jedynie najsilniejsi, którzy są najbardziej przystosowani do otoczenia.

Algorytmy genetyczne znajdują zastosowanie w zadaniach optymalizacji takich jak:

- wytyczanie trasy,
- harmonogramowanie,
- zadania transportowe,
- problem komiwojażera.

Dla każdego zadania algorytm genetyczny składa się z elementów takich jak:

- stworzenie podstawowej bazy prawdopodobnych rozwiązań,
- wybór metody tworzenia początkowej populacji prawdopodobnych rozwiązań,
- zbudowanie odpowiedniej funkcji,
- obranie odpowiednich parametrów.

Prezentowane z artykułu badania mają na celu optymalizację przejazdu przez skrzyżowanie. Chcemy, aby przez skrzyżowanie przejeżdżało jak najwięcej samochodów w jak najkrótszym czasie pod warunkiem, że żaden nie będzie musiał czekać zbyt długo na swoją kolej. Celem takiego zabiegu jest redukcja szkodliwych spalin do atmosfery oraz pośrednio zwiększenie przepustowości na ulicach poprzez zlikwidowanie wąskich gardeł na skrzyżowaniach miejskich.

W badaniach zastosowano autorki model algorytmu genetycznego.

Korzystając z oznaczeń definiujemy formalnie poprawność chromosomu dla  $k$  - pojazdów

$$\forall_{i, j, k} (K_{G_{ijk}} \neq 1)$$

(1)

Oznaczenia:

- $i$  jest numerem grupy
- $j, k$  są indeksami elementów w danej grupie ( $k$  różne od  $j$ )

Niech na  $i$ -tym pasie będzie w danej chwili  $a_i$  samochodów (może być to też współczynnik natężenia ruchu na danym pasie, oczywiście odpowiednio przeskalowany). Wtedy funkcja oceny chromosomu  $C$  wygląda następująco:

$$E(C) = \frac{\int_{R_{k,o}} \left( \sum_{k=1}^n \min(\tilde{R}_{k,o}) - 0,1 * |\tilde{R}_{k,o}| \right) d\tilde{R}_{k,o}}{\sum_{k=1}^d t_{k,o} \cdot e^{\tilde{R}_{k,o}}}$$

(2)

i

$$\tilde{R}_{k,o} = \tilde{P}_{k,o} \cdot V \cdot t_{k,o} - \sum_{i \in G_{k,o}} a_{k,i,o}$$

(3)

Gdzie:

$V$  - współczynnik szybkości pojazdów,

$P_k$  - będzie rozmytą mocą zbioru  $G_k$  (liczbą elementów danej grupy podążającej w tym samym kierunku i zwrocie na skrzyżowaniu),

$t_k$  - jest czasem palenia się światła zielonego dla danej grupy  $k$  pojazdów,

$n$  - liczba grup,

$d$  - liczba wszystkich pojazdów na skrzyżowaniu,

$a_i$  - współczynnik występowania danej grupy pojazdów.

$$a_i = \begin{cases} 3,14 \cdot e^{-\frac{(\min(\tilde{R}_{k,o}) - \tilde{R}_{k,o})^2}{\tilde{R}_{k,o}^2}} & \text{dla } G_k > 0 \\ 0 & \text{dla } G_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Jeżeli przyjmiemy model analizujący ruch w obrębie kilku skrzyżowań z uwzględnieniem interakcji między wieloma  $W$  skrzyżowaniami będzie opisany za pomocą równania oceny poprawności chromosomu.

W wyniku wszelkich analiz wybierany jest taki cykl, który generuje największą ciągłość ruchu maksymalizując wartość funkcji oceny chromosomu zgodnie ze wzorem (2).

Ocena najlepszego chromosomu (2) jest realizowana przez zmodyfikowaną funkcję wiarygodności i funkcję wyostrażania środka ciężkości wywodzącą się z teorii logiki rozmytej. W ten sposób wyznaczamy najlepszy z cykli wielu skrzyżowań pozwalający przy danych parametrach uzyskać najlepszy płynny ruch pojazdów w ich obrębie.

Należy nadmienić, że w przypadku łączenia zależnych skrzyżowań mamy przykład systemu sekwencyjnego, który może być opisana z dużym powodzeniem modelem łączącym logikę rozmytą z teorią ewidencji matematycznej [1].

Równanie dane wzorem (2) możemy teraz rozmyć zbiórmi rozmytymi [1], otrzymując rozmytą wartość oceny chromosomu:

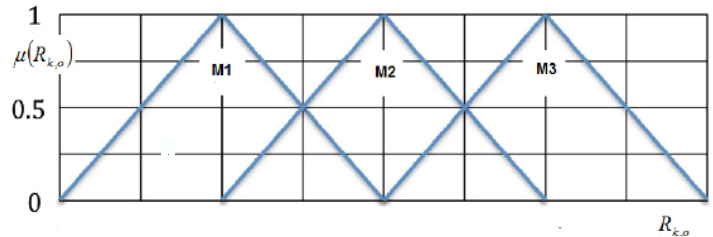
$$E_k(C) = \sup_{\tilde{R}_{k,o}} \left\{ \mu(\tilde{R}_{k,o}) \right\} \cdot \max_{1 < k < M} \mu(\tilde{R}_{k,o}) \quad (5)$$

### 3. Wyniki badań

W badaniach skupiono się na weryfikacji modelu opisanego wyżej wykorzystując do tego celu łańcuch składający się z jednego skrzyżowania i losowej ilości pojazdów samochodowych.

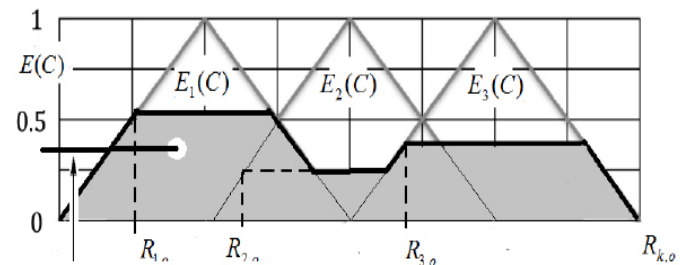
Wyniki jakie uzyskano z zastosowaniem modelu z algorytmem genetycznym z klasyfikatorem rozmytym porównano z modelem klasycznym i tradycyjnym. Model tradycyjny zakłada, że dane są stałe cykle świetlne. Natomiast model klasyczny zakłada, że sterowanie odbywa się z zastosowaniem czujników ruchu według algorytmu bazującego na zasadzie kolejki fifo. Badania wykonano z

zastosowaniem funkcji największej wiarygodności chromosomu dla każdego cyklu. Rozmytą wartość  $R_{k,o}$  uzyskano z rozmywając ową zmienną trzema trójkątnymi zbiórmi rozmytymi rozłożonymi równomiernie. Podział taki przedstawiono na rysunku 1.



Ryc 1. Model rozmytej funkcji  $R_{k,o}$   
Ryc 1. Model of the blurred  $R_k$  function

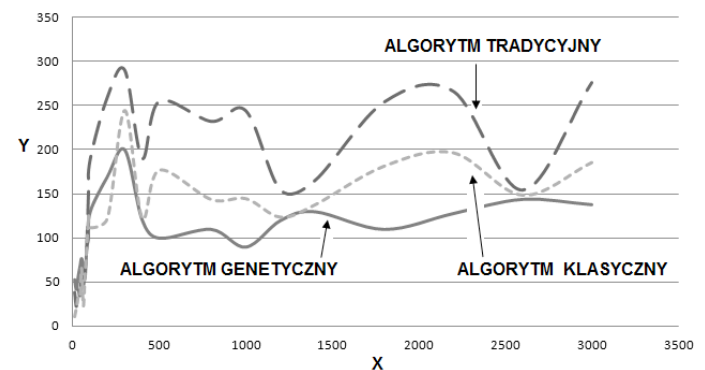
Etap wyostrażania funkcji oceny chromosomu danej równaniem 5 dla przykładowych  $k=3$  skrzyżowań można zobrazować na rysunku 2:



$$E(C) = \sup_{\tilde{R}_{k,o}} \left\{ \mu(\tilde{R}_{k,o}) \right\} \cdot \max_{1 < k < M} \mu(\tilde{R}_{k,o})$$

Ryc 2. Model wyostrażania oceny chromosomu  
Ryc 2. Model of sharpening the evaluation of the chromosome

W toku przeprowadzonych badań zbadano ruch między trzema skrzyżowaniami. Zbadano jak zmienia się płynność jazdy analizując czas pracy systemu i mierząc średni czas oczekiwania pojazdów samochodowych na przejazd przez skrzyżowanie. Uzyskane wyniki zobrazowano na rysunku 3.



Ryc 3. Wykres zależności średniego czasu oczekiwania kierowcy na opuszczenie skrzyżowania przez kierowcę w zależności od czasu działania systemu działającego na bazie algorytmu genetycznego i klasycznego. Y - średni czas przejazdu pojazdu przez skrzyżowanie w sekundach, X - czas działania systemu w minutach

Ryc 3. Graph of the relation of the average waiting time of the driver for leaving crossing the production system depending on the action time by the driver on the basis of the genetic algorithm and classical. Y - average transfer time of the vehicle through crossing in seconds, X - action time of the system in minutes



Uzyskane wyniki badań wykazały, że w przypadku sterowania ruchem pojazdów tradycyjnie z ustaloną ilością cykli uzyskano średni czas oczekiwania pojazdu samochodowego na skrzyżowaniu 152+/-91 sekund. Czas ten uzyskany za pomocą algorytmu klasycznego wynosi 125+/-37 sekund natomiast za pomocą algorytmu genetycznego uzyskano ten czas wynosił 122+/-10 sekund. Ponadto dla rozmytej oceny funkcji największej wiarygodności z zastosowaniem logiki rozmytej otrzymano porównywalne wyniki do tych zaprezentowanych na rysunku 1.

Algorytm genetyczny z klasyfikatorem rozmytym w pierwszej fazie sterowania uczył się najlepszych rozwiązań sterowania sygnalizacją i gorzej sterował sygnalizacją od tradycyjnej metody. Następnie na rysunku 3 widać, że inteligentne sterowanie okazuje się w dłuższej perspektywie czasu bardziej efektywne niż tradycyjna metoda. W toku bardziej szczegółowych badań i analiz zauważono, że algorytm genetyczny pozwala zwiększyć o około 33% płynność jazdy przez szereg skrzyżowań z porównaniu z tradycyjną metodą. Natomiast porównując wyniki uzyskane z zastosowaniem algorytmu genetycznego do metody klasycznej uzyskano poprawę o około 13%. Można zatem przyjąć, że metoda bazująca na inteligentnym sterowaniu sygnalizacją świetlną daje lepsze niż dostępne na rynku metody sterowania sygnalizacją świetlną. Nadmienić należy, że opracowane modele są rozwinięciem znanych z literatury przedmiotu algorytmów genetycznych. Zastosowanie owych metod w praktyce wiąże się z dodatkowymi symulacjami i optymalizacją rozwiązań zaproponowanych w artykule.

#### 4. Podsumowanie

W pracy udało się stworzyć operatory genetyczne z klasyfikatorem rozmytym pozwalające na optymalne sterowanie sygnalizacją świetlną w obrębie wybranego rozwiązania. Nie skupiano się na aparaturze pomiarowej prędkości i ilości pojazdów. Proponowana metoda może być z powodzeniem zastosowana do analizy przyczynowo skutkowej wąskich gardeł występującej w obrębie miasta. Analizując wyniki można nakreślić dalsze kierunki badań. Tutaj należy skupić się na innych metodach wspomagających sterowanie, tj. zbiory rozmyte czy sieci neuronowe, jak i również metody hybrydowe oraz heurystyki.

#### Literatura (References)

- [1] M. Topolski, *Komputerowe algorytmy rozpoznawania sekwencyjnego łączące teorię zbiorów rozmytych z teorią Dempstera-Shafera*. Rozprawa doktorska, PRE 01/2008, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2008.
- [2] *Transport miejski. Ekonomia i organizacja*, red. O. Wyszomirski, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2008,

## Metodyka badań wydajności małych routerów

### *The Research Methodology for Small Routers Efficiency*

Tomasz Długosz<sup>1</sup>, Radosław Wróbel<sup>2</sup>

**Treść.** „Małe” routery można obecnie spotkać w prawie każdej (małej lub średniej) firmie. Do ich najważniejszych funkcji należy podział łącza, NAT, DHCP, a czasami w przypadku bardziej zaawansowanych użytkowników także listy dostępu. Oczywiście coraz nowsze urządzenia oferują coraz większą moc obliczeniową (szybszy routing) oraz coraz większą ilość zaawansowanych (czasami ukrytych) funkcji, takich jak DDNS, 802.11n, serwer wydruku, etc. Należy dodatkowo zauważyć pozytywną cechę, polegającą na relatywnie małych cenach tych urządzeń w stosunku do oferowanych technologii czy usług. Autorzy w niniejszym artykule przedstawiają doświadczalną metodykę badania wydajności routerów do zastosowań domowych. Praca w znacznej mierze została oparta na pracy dyplomowej inż. Mariusza Kozłowskiego pt. „Analiza wydajności routerów do zastosowań domowych” (praca została obroniona z wyróżnieniem w dniu 21 kwietnia 2011).

**Słowa kluczowe:** router, wydajność routera, TCP, IP.

**Abstract.** „Small” routers are nowadays presented in almost all (small or middle) company. Their most important functions are split of connection, NAT, DHCP, and in case of intermediate users access lists. Of course a new devices are offered higher computational power (faster routing) and bigger quantity of intermediate (sometimes hidden) functions such as DDNS, 802.11n, jet print, etc. It is necessary to distinguish a positive feature, relayed on devices small prices in comparison to offered technology and services. Authors in this article are presented an experimental methodology of researches in efficiency of small routers. Work in majority was based on diploma Eng. Mariusz Kozłowski “The analysis of home routers efficiency” (the diploma was presented 21 April 2011)

**Keywords:** router, router efficiency, TCP, IP

### 1. Wstęp

Małe routery umożliwiają budowę lokalnej sieci komputerowej (zwykle zaopatrzone są w kilkuportowy switch) w oparciu o medium przewodowe i bezprzewodowe. Dostawcy Internetu oferują ciągle rosnące przepustowości łączy, co zwiększa wymagania stawiane routerom użytkownikom. Chcąc wykorzystać pełną przepustowość wykupionego łącza, stosowany router musi umożliwiać przesył danych z oczekiwanym pasmem. Przeprowadzona analiza routerów pozwoli ocenić ich wydajność oraz pokazać jej zróżnicowanie dla różnych modeli. Wyniki takich badań mogłyby stanowić punkt odniesienia dla osoby planującej zakup routera.

W niniejszym artykule wydajność rozumiana jest jako skuteczna przepustowość przesyłanych danych (*ang. effective throughput*). Oznacza ona ilość przesłanych danych w określonej jednostce czasu. Stosowaną jednostką jest Mb/s.

Do przeprowadzenia analizy wydajności urządzeń niezbędne było zaprojektowanie metodyki badań. Testy przeprowadzono w oparciu o specjalistyczne oprogramowanie, opracowane metody pomiarowe oraz zaprojektowane topologie sieciowe. Wydajność routerów mierzona była w

transmisji opartej na dwóch protokołach transportowych – TCP i UDP. Pod kątem medium transmisyjnego stosowanego w sieci lokalnej analiza obejmuje osobno przesył danych z wykorzystaniem medium przewodowego i bezprzewodowego.

### 2. Router

Router to urządzenie sieciowe służące do łączenia sieci komputerowych. Jego głównym zadaniem jest proces zwany trasowaniem (*ang. routing*), czyli wyznaczaniem najlepszej trasy dla pakietów i przekazywanie ruchu sieciowego w ustalonym kierunku [1]. Generalnie router działa w trzech pierwszych warstwach (fizycznej, łącza danych, sieciowej) modelu ISO/OSI. Analizując każdy pakiet danych, podejmuje decyzję, do którego interfejsu wyjściowego go przekazać, w celu dalszej transmisji. Dokonuje tego porównując adres logiczny odbiorcy, znajdujący się w nagłówku pakietu z adresami sieci docelowych zapisanymi w tablicy routingu. Wyróżniamy routing statyczny i dynamiczny. W routingu statycznym trasy do sieci docelowych wprowadzane są ręcznie do tablicy routingu, natomiast routing dynamiczny oparty jest na protokołach

<sup>1</sup>Politechnika Wrocławska, Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki

<sup>2</sup>Wrocławska Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej, Wydział Informatyki

routingu. Za ich pomocą routery wymieniają między sobą informacje o trasach do sieci docelowych.

Routery będące obiektem badań przeznaczone są do zastosowań w domach lub niewielkich biurach. Służą przede wszystkim do budowy lokalnej sieci komputerowej oraz podziału łącza z dostępem do sieci Internet pomiędzy hostami w sieci LAN. Komputery w sieci lokalnej mogą zostać podłączone do routera za pomocą medium przewodowego i bezprzewodowego. Umożliwia to wbudowany w urządzenie przełącznik oraz punkt dostępowy sieci bezprzewodowej.

Routery do zastosowań domowych konfiguruje się przez przeglądarkę internetową. W pasku adresu należy wpisać lokalny adres IP routera, po czym zalogować się poprzez podanie loginu i opcjonalnie hasła. Interfejsy konfiguracji urządzeń są zaprojektowane z myślą o niezaawansowanych użytkownikach, menu z dostępnymi opcjami są wykonane czytelnie. Częstym zabiegiem ułatwiającym konfigurację jest krótkie wytłumaczenie zastosowania danej opcji.

### 3. Typowe funkcje, technologie i protokoły

Poniżej przedstawiono najważniejsze cechy małych routerów. Jak wspomniano, wachlarz parametrów jest ciągle rozszerzany, wraz ze wzrostem możliwości technologicznych fabryk producentów sprzętu.

1. Czteroportowy przełącznik. Wbudowany w router 4-portowy przełącznik (*ang. switch*) umożliwia podłączenie czterech komputerów za pomocą kabla typu skrętka zakończonych wtykami RJ-45. Komputery te tworzą lokalną sieć komputerową, mogą przysyłać między sobą dane nie posiadając dostępu do sieci Internet. Przełącznik to urządzenie sieciowe działające w warstwie pierwszej i drugiej modelu ISO/OSI, kieruje ruchem na podstawie adresów MAC zawartych w nagłówku warstwy łącza danych [2]. Dzięki wbudowanemu przełącznikowi znika konieczność stosowania osobnego urządzenia tego typu, co dla użytkownika domowego jest znacznym udogodnieniem.

2. Punkt dostępowy sieci bezprzewodowej. Punkt dostępu sieci bezprzewodowej WLAN (*ang. Wireless Local Area Network*) to centralny nadajnik i odbiornik, który wymienia dane z hostami w sieci poprzez fale radiowe [3]. W przeciwieństwie do połączeń kablowych, zalety takiego rozwiązania to wygodny dostęp do sieci dla komputerów przenośnych oraz łatwa instalacja.

3. NAT. Komunikacja w sieciach komputerowych TCP/IP opiera się obecnie na adresacji IP w wersji 4. Każdy host chcący połączyć się z Internetem musi posiadać unikatowy adres IP. Ze względu na ciągły wzrost komputerów przyłączanych do sieci oraz ograniczoną pulę adresów IP w wersji 4, opracowano nowy schemat adresacji IP w wersji 6 [2]. Jednak jego implementacja jest procesem długoterminowym, dlatego powstało rozwiązanie zastępcze, czyli NAT (*ang. Network Address Translation*). Idea NAT polega na przydzieleniu np. firmie jednego adresu IP, dzięki któremu możliwa będzie komunikacja z Internetem. Me-

chanizm NAT służy do translacji prywatnych adresów IP na adresy zewnętrzne [2]. Kiedy pakiety opuszczają sieć wewnętrzną mechanizm NAT przekształca je na zewnętrzny adres IP przydzielony przez dostawcę Internetu. Umożliwia tym samym dostęp do sieci Internet komputerom znajdującym się w sieci wewnętrznej. Każdy z nich widoczny jest „na zewnątrz” pod jednakowym adresem IP. NAT musi być zaimplementowany na granicy sieci wewnętrznej z publiczną, a takim miejscem jest router.

4. Serwer DHCP. Serwer DHCP przydziela hostom w sieci lokalnej pełne dane konfiguracyjne wymagane do komunikacji, czyli adres IP, maskę podsieci, adres bramy oraz adresy serwerów DNS [4]. Dzięki temu nie ma konieczności wpisywania ich ręcznie na każdym urządzeniu. Adresy dla klientów sieci przydzielane są z ustalonej puli. Po podłączeniu do sieci, komputer kliencki rozgłasza żądanie o przypisanie adresu IP. W odpowiedzi serwer wysyła dane konfiguracyjne, które są dzierżawione na określony przedział czasu. Po jego upływie adres jest zwalniany lub w razie ciągłego użycia dzierżawa jest odnawiana [4].

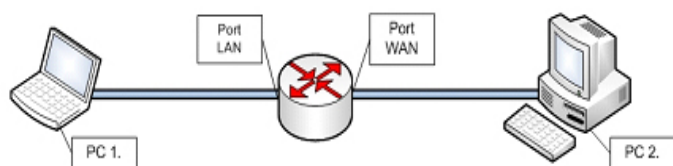
5. Firewall. Zapora sieciowa (*ang. Firewall*) to mechanizm kontroli dostępu do sieci zabezpieczający przed nieautoryzowanym dostępem spoza sieci. Rolę zapory sieciowej spełnia router łączący sieć prywatną z publiczną. Routery przeznaczone do zastosowań domowych wyposażone są w dwa typy zapór sieciowych: filtrujących pakiety (stosowane w starszych urządzeniach) i badające stan pakietów [4].

6. Przekierowanie portów. Przekierowanie portów (*ang. port forwarding*) to proces wykonywany przez mechanizm PAT. Umożliwia nawiązanie połączenia przez komputer z sieci zewnętrznej, np. Internetu, z komputerem w sieci LAN znajdującym się za PAT'em. Wszystkie zapytania przychodzące z sieci zewnętrznej na przekierowany port danej usługi będą kierowane do wskazanego adresu IP. Przekierowanie portów umożliwia np. uruchomienie publicznego serwera WWW w sieci LAN lub korzystanie z gier on-line.

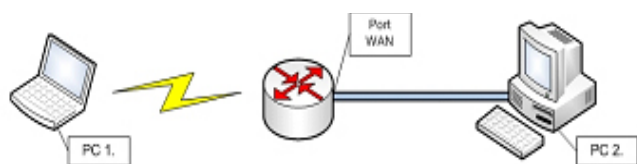
7. DMZ – Strefa zdemilitaryzowana. Włączenie funkcji DMZ (*ang. Demilitarized Zone*) dla danego komputera w sieci LAN powoduje kierowanie do niego całego ruchu przychodzącego z sieci zewnętrznej. Domyślnie przekierowywane są wszystkie porty na adres IP tego hosta. Zastosowanie ma to dla komputera, na którym uruchamiane są gry wykorzystujące dostęp do sieci Internet. Routery do zastosowań domowych oferują możliwość umieszczenia jednego komputera w strefie DMZ, podając w konfiguracji jego adres IP. Istota funkcji DMZ oferowanej w routerach jest jednak inna, niż zadanie strefy zdemilitaryzowanej w sieciach komputerowych. Jest to bowiem wydzielony obszar sieci znajdujący się poza zaporą sieciową, w którym umieszczane są hosty pełniące usługi zewnętrzne. Takie rozwiązanie zwiększa bezpieczeństwo chronionej sieci, ponieważ tylko strefa DMZ jest widoczna dla sieci wewnętrznej [4].

#### 4. Metodyka badań

W celu przeprowadzenia pomiarów wydajności routerów zostały zaprojektowane i wykorzystane trzy topologie sieci. Każda z topologii posiada różne warianty ze względu na dwa typy zastosowanego medium.



Rys. 1. Topologia metodyczna, wariant A

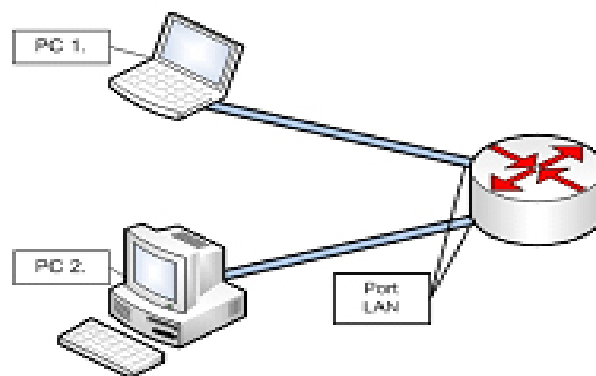


Rys. 2. Topologia metodyczna, wariant B

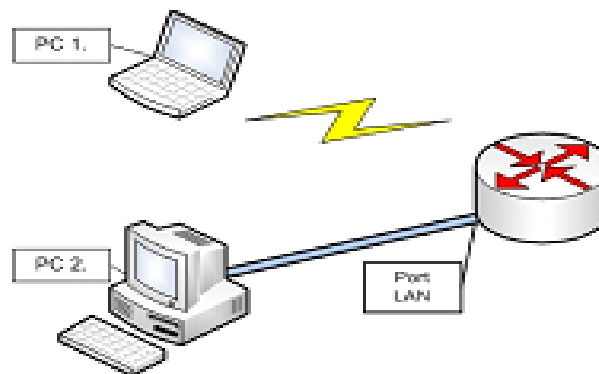
Medium przewodowym wykorzystanym w topologiach był kabel typu skrętka nieekranowana UTP (*ang. Unshielded Twisted Pair*) kategorii 5e, zakończona złączami RJ-45. Przesył danych odbywał się w technologii Fast Ethernet z pasmem 100 Mb/s. Połączenie bezprzewodowe wykonane w technologii bezprzewodowej w standardzie 802.11g w paśmie 54 Mb/s. Komputery wykorzystujące to połączenie znajdowały się w tym samym pomieszczeniu co router.

Pierwsza „grupa” topologia odwzorowuje połączenie sieci zewnętrznej WAN z wewnętrzną LAN. Zastosowane są dwie wersje tej topologii ze względu na rodzaj medium w sieci lokalnej. Wariant A przedstawia połączenie przewodowe komputera PC1 do portu LAN routera. W topologii B to samo połączenie jest wykonane w technologii bezprzewodowej. W obu przypadkach komputer PC2 podłączony jest za pomocą skrętki UTP do portu WAN routera. Pomiar opierający się na topologii pierwszej odwzorowuje transfer danych pomiędzy hostem w sieci lokalnej a serwerem w sieci Internet. Otrzymane wyniki określają wydajność mechanizmu routingu urządzeń, czyli przekazywania pakietów między sieciami.

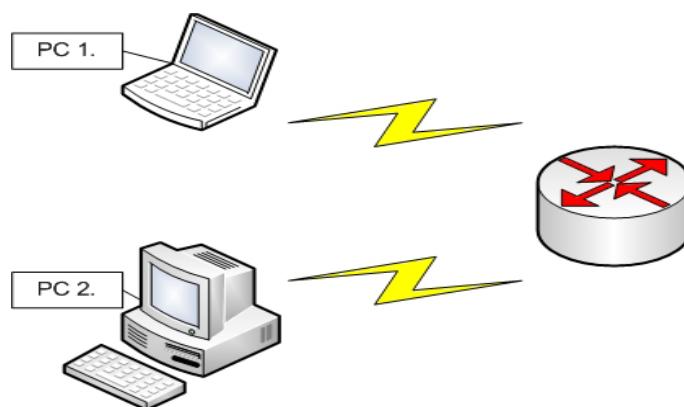
Druga „grupa” topologii to połączenie dwóch hostów w sieci lokalnej. Kolejne warianty różnią się rodzajem medium. W topologii C zastosowano tylko połączenie przewodowe, w D połączenie mieszane, E opiera się na medium bezprzewodowym. Pomiary, wykonane na podstawie tych topologii, posłużą do oceny wydajności mechanizmu przełączania pakietów.



Rys. 3. Topologia metodyczna, wariant C



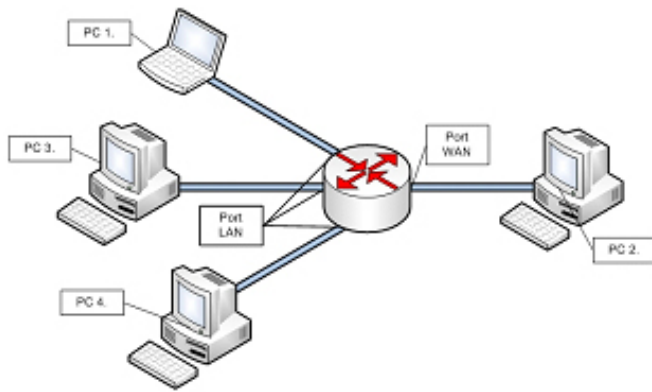
Rys. 4. Topologia metodyczna, wariant D



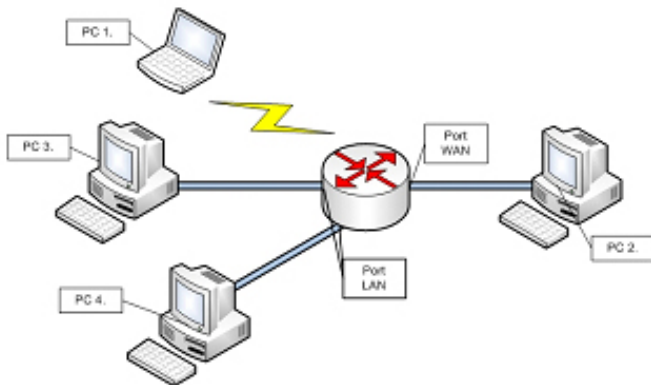
Rys. 5. Topologia metodyczna, wariant E

W trzeciej „grupie” topologii wykorzystano cztery komputery, trzy po stronie sieci lokalnej i jeden po stronie sieci zewnętrznej. Wariant F opiera się na medium przewodowym. Hosty PC1, PC3 i PC4 podłączone są do portów LAN routera, PC2 do portu WAN. W drugim przypadku, czyli G, PC1 podłączono do routera bezprzewodowo. Topologia trzecia posłuży do oceny wpływu dodatkowego ruchu w sieci lokalnej na wydajności testowanego urządzenia. Analogicznie do topologii pierwszej, pomiar ma miejsce między hostami PC1 i PC2, natomiast hosty PC3 i PC4 posłużą do generowania dodatkowego ruchu w sieci LAN.





Rys. 6. Topologia metodyczna, wariant F

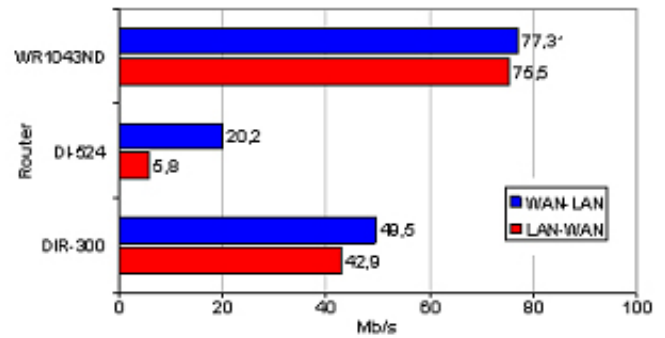


Rys. 7. Topologia metodyczna, wariant G

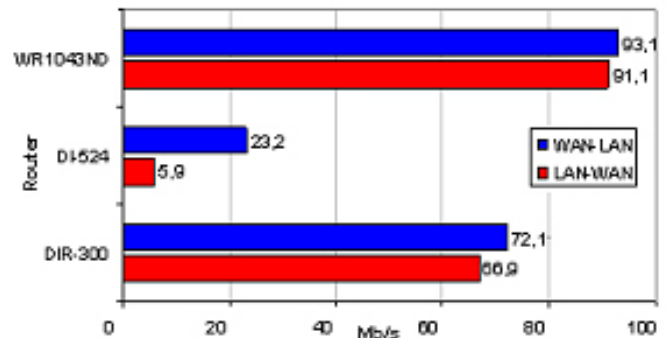
W każdym z testów porównawczych zastosowano ten sam schemat adresacji oraz te same urządzenia końcowe. Do testów wykorzystano otwarte oprogramowanie: Netperf 2.4, Performance Test 7, Wireshark (wszystkie trzy do badania przepustowości transferu), WinAgent TFTP i Apache http Server (służące do uruchomienia usług). W przypadku każdego z testów porównawczych pobierano te same pliki, opierając się o tą samą usługę.

## 5. Wyniki badań

Pierwszą serię badań oparto na masowym przesyłaniu przy wykorzystaniu protokołu TCP. Stosowano domyślny rozmiar wysyłanych wiadomości równy 8192 bajty. Rozmiar ten przekracza wielkość MTU sieci (1500 bajtów), dlatego w warstwie transportowej dane dzielone były na segmenty o wielkości 1460 bajtów. W drugim teście, opartym na protokole transportowym UDP, ustawiono wielkość transmitowanych danych na 1024 bajty. Domyślnie program wysyła wiadomości liczące 8192 bajty, co przekracza rozmiar MTU i powoduje segmentację danych w warstwie sieciowej. W takiej sytuacji pojawiał się problem. Otrzymywane wyniki były nieprawidłowe, ponieważ skuteczna szybkość przesyłania danych przekraczała teoretyczną maksymalną wartość dla użytej technologii transmisji. Pomiary wykonano trzykrotnie, zaokrąglając wynik końcowy.

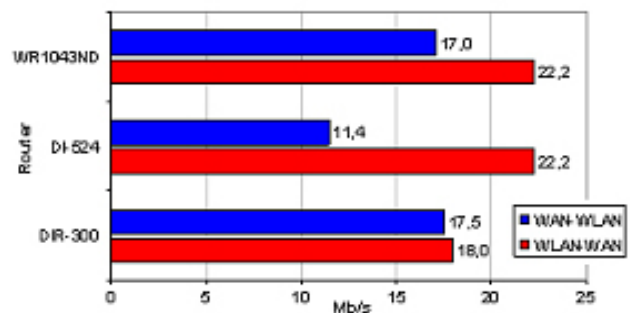


Rys. 8. Wyniki pomiarów programem Netperf (protokół TCP, topologia A)



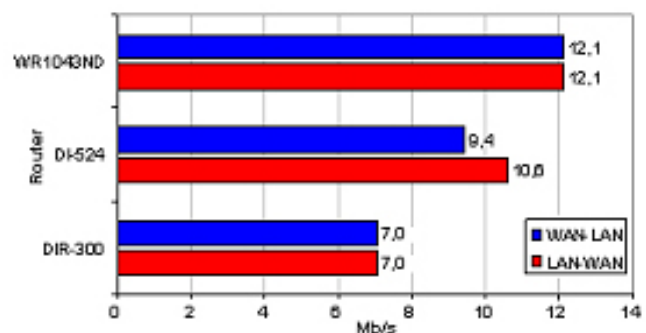
Rys. 9. Wyniki pomiarów programem Performance Test 7 (protokół TCP, topologia A)

Podobne pomiary wykonano dla topologii B (z wykorzystaniem medium bezprzewodowego). W tym wypadku programy testujące wykazały tą samą tendencję, tzn. wyniki wskazują na te same wnioski, bez względu na program.

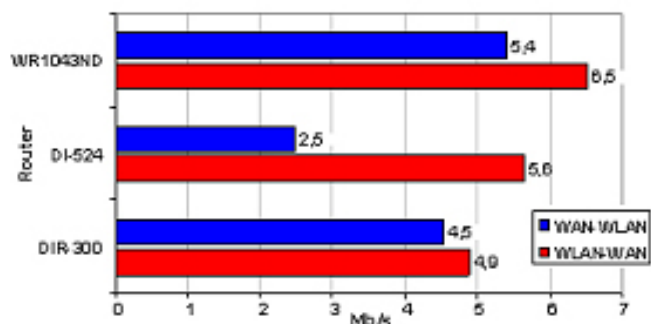


Rys. 10. Wyniki pomiarów programem Performance Test 7 (protokół TCP, topologia B)

Powyższe badania przeprowadzono także dla protokołu UDP (opierając się na serwerze TFTP). Poniższe rysunki prezentują wyniki testów dla topologii A i B.

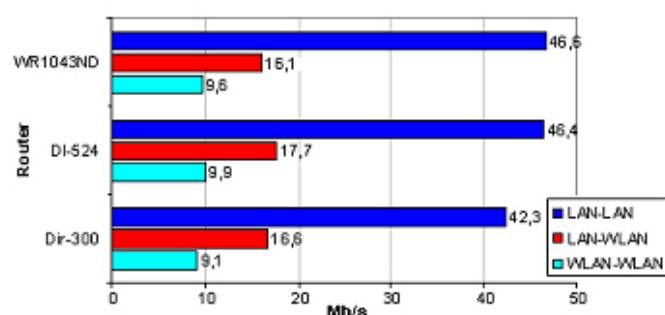


Rys. 11. Wyniki pomiarów programem Netperf (protokół UDP, topologia A)

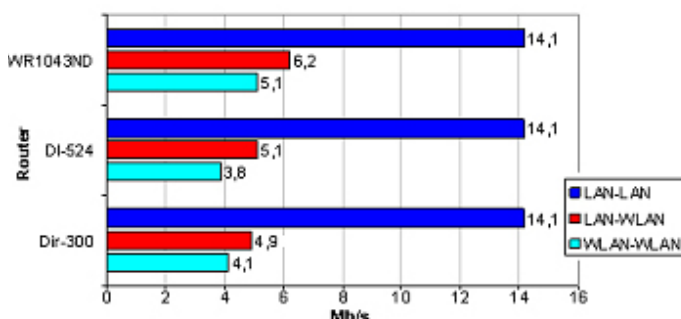


Rys. 12. Wyniki pomiarów programem Netperf (protokół UDP, topologia B)

Podobne testy wykonano dla topologii C, D oraz E. Wszystkie użyte programy wykazały tą samą tendencję w przepustowości. Poniżej przedstawiono otrzymane uśrednione wartości dla protokołów TCP oraz UDP.

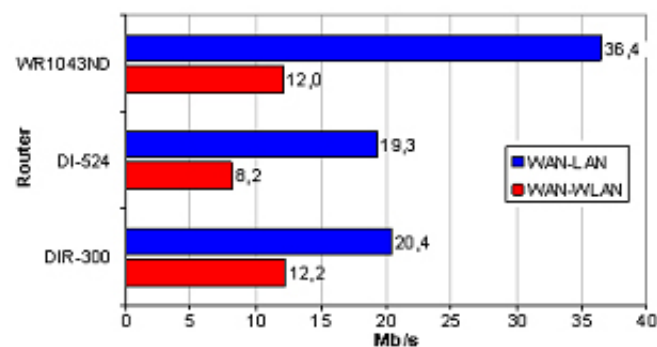


Rys. 13. Wyniki pomiarów; transfer do / z serwera HTTP (protokół TCP, topologia C, D, E)



Rys. 14. Wyniki pomiarów; transfer do / z serwera TFTP (protokół UDP, topologia C, D, E)

Technologii F i G użyto do testów, opartych o protokół TCP (transfer z / do zainstalowanego serwera Apache HTTP). Wyniki zaprezentowano na rys. 15.



Rys. 15. Wyniki pomiarów; transfer do / z serwera HTTP (protokół TCP, topologia F, G)

## 6. Wnioski

Do najważniejszych wniosków użytkarnych i naukowych należą:

1. Rozmiar datagramu UDP używanego w transmisji danych ma wpływ na jej wydajność. W przeprowadzonych testach przy rozmiarze datagramu równym 1024 bajty, osiągane szybkości przesyłu danych były wyższe, niż w przypadku datagramu wielkości 512 bajtów. Mowa tu o wynikach z programów Netperf i Performance Test. W teście z wykorzystaniem serwera TFTP wyniki, mimo datagramów liczących 1024 bajty, były znacznie niższe, co było skutkiem dodatkowego narzutu spowodowanego wysyłaniem, w przypadku protokołu TFTP, potwierdzeń odbioru.
2. Większe przepustowości przesyłu danych osiągnano w transmisji opartej o protokół transportowy TCP. Wynika to z bardzo małej liczby błędów w transmisji i tym samym mniejszego narzutu spowodowanego retransmisją pakietów. W rzeczywistych warunkach, w których serwer i klient znajdują się w znacznej odległości w sieci, błędy transmisji są znacznie częstsze. W takim przypadku transmisja oparta na protokole UDP okazuje się wydajniejsza.
3. Nowsze routery charakteryzują się większymi pasmami pobierania danych, natomiast większe pasmo wysyłania danych jest przymiotem routerów starszych. Wynika to z narzutów na procesor routera w przypadku coraz większej ilości oferowanych usług.
4. Wydajność urządzeń działających tylko w sieci lokalnej jest na zbliżonym poziomie – oznacza to mały skok technologiczny w wypadku integrowanych switchy.
5. Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty badań – nowsze modele routera oferują większą moc obliczeniową co pozytywnie wpływa na pasmo (z zastrzeżeniem punktu 3).

## Literatura (References)

- [1] Amato V. *Akademia sieci Cisco: pierwszy rok nauki*. MIKOM, Warszawa 2001.
- [2] Tanenbaum A. *Sieci komputerowe*. HELION, Gliwice 2004.
- [3] Ross J. *Sieci bezprzewodowe: przewodnik po sieciach Wi-Fi i szerokopasmowych szerokopasmowych sieciach bezprzewodowych*. HELION, Gliwice 2009.
- [4] Scrimger R., LaSalle P. i inni. *TCP/IP. Biblia*. HELION, Gliwice 2002.
- [5] Kozłowski M. *Analiza wydajności routerów do zastosowań domowych*. Praca dyplomowa inżynierska, WWSIS 2011.