

**Dr inż. Ryszard Klempous**

**Katedra Automatyki, Mechatroniki**

**i Systemów Sterowania** <http://www.iiar.pwr.wroc.pl/>

Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 WROCŁAW

## **ZAŁĄCZNIK 2**

### **Autoreferat**

#### **do Wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego**

Opis dorobku i osiągnięć naukowych stworzony w oparciu o rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopienia doktora habilitowanego - Zgodnie z Art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw (Dz. U. nr 84, poz. 455).

Wrocław, grudzień 2014

## Spis treści

1. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	4
2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....	4
3. Charakterystyka osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę wystąpienia z wnioskiem o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.....	4
3.1. Wykaz publikacji przed doktoratem (1971-1980) .....	4
3.2. Opis dorobku naukowego .....	5
3.2.1. Wykaz publikacji po doktoracie (1980-2014).....	5
3.2.2. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.) .....	6
3.2.2.1. Lista wyselekcjonowanych czternastu prac zawierających najważniejsze osiągnięcia w cyklu publikacji powiązanych tematycznie w ramach tematu: „ <i>Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów</i> ” .....	7
3.2.3. Wykaz prac składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie. ....	8
3.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników prac stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego .....	13
3.3.1. Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów - Główne cele i najważniejsze osiągnięcia badań .....	15
3.3.1.1. Opis modelu systemu.....	17
3.3.1.2. Algorytm symulacji sieci dystrybucji wody .....	19
3.3.1.2.1 Transformacja modelu sieci dystrybucji wody .....	20
3.3.1.2.2 Algorytm wyznaczania kierunku poszukiwań wykorzystujący zmodyfikowaną metodę Newtona .....	20
3.3.1.2.3. Własności procedury wyznaczania minimum w kierunku .....	20
3.3.1.3 Sterowanie operacyjne w sieciach dystrybucji wody .....	21
3.3.1.3.1. Sformułowanie problem statycznego.....	21
3.3.1.3.2. Metoda rozwiązywania problemu optymalizacji statycznej system dystrybucji wody .....	22
3.3.1.4. Omówienie uzyskanych wyników związanych z Aspektami optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów na przykładzie systemów dystrybucji wody .....	23
3.3.2. Ważniejsze cele i wyniki badań w zakresie Aspektów modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych. ....	27
3.3.2.1. Opis instalacji ACUREX w Plataforma Solar de Almería .....	28
3.3.2.2. Własności hierarchicznej struktury sterowania w instalacji ACUREX .....	30
3.3.2.3 Modelowanie i symulacja pracy kolektorów parabolicznych ACUREX.....	32
3.3.2.4. Opis ‘Wieloaspektowego podejścia do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych’ z wykorzystaniem techniki dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych(słonecznych) w instalacji ACUREX .....	35
3.3.2.4.1. Analiza warstwy Warstwy Górnej Dyspozytora w instalacji ACUREX – (Upper layer: Reference Governor).....	41
3.3.2.4.2. Optymalizacja Poziomu Dyspozytora (ORG - Optimizing Reference Governor) w instalacji ACUREX) .....	42
3.3.2.5. Analiza eksperymentów związanych z Wieloaspektowym podejściem do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów	

hierarchicznych z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych instalacji ACUREX.....	44
3.3.2.6. Zastosowanie technik informatycznych do analizy danych związanych z Wieloaspektowym podejściem do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych instalacji ACUREX.....	46
3.3.2.7. Omówienie uzyskanych efektów związanych z Wieloaspektowym podejściem do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych instalacji ACUREX .....	47
3.3.3. Główne cele i ważniejsze osiągnięcia w zakresie Analizy metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks).....	48
3.3.3.1. Analiza metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN). .....	50
3.3.3.2. Analiza metod modelowania zagadnień współpracy elementów WSN .....	52
3.3.3.3. Analiza metod modelowania zachowań relacyjnych elementów WSN .....	66
3.3.3.3.1. Relacyjny model komunikacji w WSN.....	67
3.3.3.3.2. Tworzenie działań – Łańcuchy .....	70
3.3.3.4. Symulacja zachowań WSN .....	73
3.3.3.4.1. Organizacja sąsiedztwa i efektywnej komunikacji sieciowej.....	75
3.3.3.5. Zorientowana (directed) współpraca w sieci multi-hop .....	78
3.3.3.5.1. Relacje, łańcuchy działań.....	80
3.3.3.5.2 Współpraca sąsiednich węzłów .....	81
3.3.3.6 Omówienie uzyskanych wyników związanych z Analizą metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN) .....	83
4. Aktywność naukowa.....	85
4.1. Udział w konferencjach naukowych.....	85
4.2. Członkostwo w zespołach redakcyjnych czasopism, recenzje publikacji oraz recenzowanie kandydatów do ENI Award .....	86
4.3. Staże naukowe .....	87
4.4. Udział w projektach badawczych .....	88
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....	90
5.1 Efektywne metody przetwarzania obrazów wirtualnej rzeczywistości i technologii <i>Motion Capture (MoCap)</i> . .....	90
5.2. Procesy kierowania rozproszonymi zespołami projektowymi na przykładzie komputerowo wspomaganym procesów dydaktycznych.....	95
5.3. Wspomaganie procesu planowania pracy koparek w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego. ....	96
5.4. Wspomaganie procesu rozkroju surowca, sterowani a ruchem ulicznym i problemy metodologii i technologii planowania w budynkach inteligentnych. ....	96
6. Osiągnięcia dydaktyczne .....	96
7. Aktywność międzynarodowa. ....	98
8. Inne osiągnięcia habilitanta. ....	100
9. PODSUMOWANIE .....	101

## 1. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Magister inżynier elektroniki, specjalność automatyka, Politechnika Wroclawska we Wroclawiu, Wydział Elektroniki, 1971.
- Doktor nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka, Politechnika Wroclawska we Wroclawiu, Wydział Elektroniki, Instytut Cybernetyki Technicznej, 1980.

## 2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.10.1971 – 31.08.1980: Asystent, starszy asystent; od 01.09.1980: Adiunkt Politechnika Wroclawska we Wroclawiu, Wydział Elektroniki, Instytut Informatyki, Automatyki i Robotyki (dawniej Instytut Cybernetyki Technicznej). Ostatnio w Katedrze Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania (K-8).

## 3. Charakterystyka osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę wystąpienia z wnioskiem o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Dorobek naukowy od początku pracy na Politechnice Wroclawskiej (PWr) obejmuje 237 pozycji, z czego 164 stanowią różnego rodzaju publikacje. Do obrony doktoratu (1980 r.) dorobek obejmuje 30 pozycji, w tym publikacji 11 (w tym 4 zagraniczne).

### 3.1. Wykaz publikacji przed doktoratem (1971-1980)

- 1) **Klempous Ryszard**, Sikorski Miron: *Algorithms for Webers problem with set-inclusive constraints. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universitat Dresden. 1980 Jg. 29, H. 2, s. 436-439,*
- 2) **Klempous Ryszard**: *Generalized Weber's a problem and its application. W: Progress in cybernetics and system research, Linz, 28th-3st March 1978]. Vol. 6. Biocybernetics, System Analysis, Systems Engineering Methodology. Mathematical Systems Theory. Washington: Hempshire Publ. Corp., [1980]. s. 338-346,*
- 3) Janik Leslaw, **Klempous Ryszard**, Kryczka Zdzislaw: *Algorytmy optymalnej lokalizacji. W: Metody i środki projektowania automatycznego. II Konferencja, Warszawa, 7-10 listopada 1979. Zbiór referatów. Cz. 1. Warszawa, 1979. s. 151-160,*
- 4) Jarnicki Jacek, **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy: *Optimization of reliability in series systems. W: Niezawodność i eksploatacja systemów komputerowych. RELCOMEX '79. Pierwsza Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Zamek Książ, 25-29.09.1979. Materiały konferencyjne. s. 197-207,*
- 5) Jarnicki Jacek, **Klempous Ryszard**: *Optimization models of a planning system for a given set of excavators in open-cast lignite coal mine. W: Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society, Tokyo-Kyoto, November 3-7, 1978. Vol. 1.s. 745-748,*
- 6) Jarnicki Jacek, **Klempous Ryszard**: *Optimization models of a planing system for a given set of excavators in opencast coal mine. W: Information systems and operation research in mining. Proceedings of the conference "ISORM", Oleśnica, September, 1978. Wroclaw, 1978. s. 469-481,*
- 7) **Klempous Ryszard**: *Zagadnienie minimalizacji sumy norm w przestrzeniach skończenie wymiarowych. W: Konferencja naukowa. Automatyzacji projektowania. Referaty, Białystok, maj 1978. Białystok, 1978. s. 95-105,*
- 8) **Klempous Ryszard**: *Mnogoetapna optimizacija na fundamenta ploca na osnovata na opredelenije na tovarite i izmenenie na i vicnata koravina na plocata. Statyba (Bułgaria). 1976 nr 9, s. 18-22, 8*
- 9) Galkowski Krzysztof, Szlachcic Ewa, Caban Jan, Gawrych-Żukowski Andrzej, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek, Stanicki Tadeusz, Domaradzki Jerzy, **Klempous Ryszard**, Jabłońska Małgorzata: *Teoria systemów. Praca zbiorowa. Krzysztof Galkowski. Wroclaw: PWr, 1975. 204 s.,*
- 10) **Klempous Ryszard**: *Analiza dwupoziomowego systemu sterowania ochroną atmosfery. Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wroclawskiej. Studia i Materiały. 1975 nr 19, s. 93-108,*
- 11) Domaradzki Jerzy, **Klempous Ryszard**, Szlachcic Ewa, Stanicki Tadeusz: *Wielopoziomowy model informatyczny systemu sterowania kopalnią odkrywkową. W: Informatyka w pracach badawczych Dolnego Śląska. (Materiały z konferencji zorganizowanej przez PWr, Wroclaw, 13-14 lutego 1973). Wroclaw, 1973. s. 235-267, (Prace Naukowe Instytutu Organizacji i Zarządzania Politechniki Wroclawskiej, ISSN; nr 7).*

Prace te były związane głównie z zagadnieniami budowy modeli procesów oraz ich symulacją i optymalizacją. Był to efekt realizacji projektów dla potrzeb przemysłu, głównie dla górnictwa odkrywkowego. Opracowano koncepcję sterowania pracą Kombinatu Węgla Brunatnego (KWB) Turów oraz cele i zadania dla układu sterowania i zarządzania obiektem; określono zadania automatyzacji KWB Turów.

Zbudowano model matematyczny optymalnego planowania czasów pracy i wydajności elementów układów wydobywczo-transportowych i podstawowe procedury hierarchiczne kompleksowego sterowania układami wydobywczo-transportowymi KWB Turów.

Opracowano i wdrożono na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej System Opt I do wspomagania nauczania w zakresie metod optymalizacji deterministycznej.

Wieloaspektowym podejściem do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów zajmuję się od początku swojej działalności naukowej.

### 3.2. Opis dorobku naukowego

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych (1980r.) kontynuowałem prace związane z wieloma zagadnieniami z zakresu modelowania, symulacji i optymalizacji procesów. Do najważniejszych z nich należy:

- rozwój metod optymalizacji i symulacji w sieciach dystrybucji mediów (1981 – 2002),
- wykorzystanie metod optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych (od 1999),
- badanie metod lokalizacji i symulacji (od 2001) w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensor Networks).

Przedmiotem moich zainteresowań były również komputerowo wspomagane procesy wspomaganie decyzji oraz wykorzystanie metod przetwarzania danych.

Większość wykonywanych przeze mnie prac badawczych wynikała z udziału w projektach w ramach współpracy dwustronnej z Austrią, Hiszpanią oraz w innych projektach międzynarodowych (USA, Australia, Niemcy) jak również w projektach ministerialnych.

Wiele prac badawczych wiąże się z moimi pobytami w zagranicznych ośrodkach badawczych, takich jak: Austria: Johannes Kepler University, Linz; USA: University of Arizona, Department of Electrical and Computer Engineering, Tucson; ASTEC Laboratory; Murray Hill, Bell Labs, Northern Arizona University (NAU), Flagstaff, AZ, Rutgers University, NJ; Hiszpania: Universidad de Malaga, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Universidad de Almeria; Australia: University of Technology Sydney.

Szczegółowe informacje dotyczące staży naukowych przedstawione są w punkcie 4.3.

#### 3.2.1. Wykaz publikacji po doktoracie (1980-2014)

Mój dorobek po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w roku 1981 obejmuje łącznie 207 pozycji, w tym prac niepublikowanych 54 (p. Zał.3.1.).

Prace te zestawiono poniżej.

PUBLIKACJE:	153
patenty lokalne ( w tym jeden zgłoszony w 2014 roku):	2
cytowań ogółem wg WOS	74
h-index wg WOS (bez autocytowań):	4
cytowań ogółem wg Scopus:	87
index h wg Scopus: od 1966r (bez autocytowań)	6
PRACE NIEPUBLIKOWANE PWR	54

Ważniejsze osiągnięcia, na podstawie, których ubiegam się o nadanie stopnia doktora habilitowanego, to 153 publikacji naukowych powstałych po doktoracie. Spośród tych prac 16 znajduje się w bazie Journal Citation Report (LF) - są to następujące czasopisma: Journal of Computational and Applied Mathematics (6), Mathematics and Computers in Simulation (1), European Journal of Operational Research (1), IEEE Transaction on Automatic Control (1), Lecture Notes in Computer Science (6), Acta Polytechnica Hungarica (1) oraz czternaście rozdziałów w książkach (w tym w Springer Verlag – 5, River Publisher -2). Oprócz tego redagowałem pięć monografii (Spinger Verlag - 2, River Publisher - 2 i WNT - 1).

**3.2.2. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.).**

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wniosku habilitacyjnego określonym jest cykl publikacji powiązanych tematycznie:

**„Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”.**

Tematyką tych publikacji są:

**i) Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów.**

Prace w tej dziedzinie rozpoczęto we wczesnych latach osiemdziesiątych i kontynuowano do roku 2002. Były w dużej części finansowane w ramach różnych projektów ministerialnych dotyczących sieci dystrybucji wody i gazu. Aktualnie, w wyniku podpisania porozumienia przez PWr z IBM Research Center, Haifa, pojawiła się możliwość realizacji wspólnych projektów w zakresie systemów dystrybucji wody:

*Date: Sun, 01 Jul 2012 10:17:37 +0300*

*Subject: Cooperation themes: Wrocław - Haifa*

*„Following our call and correspondence I identified three groups in Haifa for potential cooperation with the university. I suggest that we first connect the senior researchers and team leaders in Haifa with the professors in Wrocław, by phone calls or emails, so that they can start exploring if there is a good match.”*

**The people/subjects are:**

**Dr. Asaf Adi, manages the Business and Systems Solutions department, and they run projects on smart water management. He would like to check with you and Professor Klempos if some joint work can be defined on Water.**

**Zainteresowanie ośrodka IBM tą problematyką to efekt seminarium roboczego i wygłoszonych przeze mnie referatów (Haifa, grudzień, 2011).**

**ii) Aspekty modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych.**

Projekty te zostały rozpoczęte w ramach współpracy dwustronnej z Hiszpanią oraz były i są wspierane przez inne granty międzynarodowe (od 1999).

**iii) Analiza metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks).**

Od roku 1999 wspólnie z uniwersytetami w USA: Northern Arizona University, Flagstaff, oraz University of Arizona, Tucson AZ; wybrano, opracowano i przetestowano oprogramowanie niezbędne do realizacji międzynarodowych projektów w ramach Global Engineering College (GEC). Korzystając z doświadczenia uzyskanego przy realizacji projektu „24/7 Software development...” rozpoczęto również prace związane z analizą, modelowaniem i symulacją Bezprzewodowych Sieci Czujników (Wireless Sensors Networks - WSN) – Uczestniczę w realizacji projektów związanych z tą tematyką od roku 2001 w ramach współpracy z University of Arizona, Department of Electrical and Computer Engineering, Tucson oraz z University of Technology Sydney.

Od 2008 uczestniczyłem w realizacji projektu:

**„Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku – modelowanie i monitoring zagrożeń”.**

Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, 2007-2013, Numer projektu POIG.01.03.01-02-002/08

### 3.2.2.1. Lista wyselekcjonowanych czternastu prac zawierających najważniejsze osiągnięcia w cyklu publikacji powiązanych tematycznie w ramach tematu: „Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”.

Cykl publikacji powiązanych tematycznie w ramach tematu: „Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów stanowi ponad 60 publikacji. Habilitant wyselekcjonował czternaście prac zawierających najważniejsze osiągnięcia omawianej tematyki.

#### Są to prace z LF:

1. Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**: Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717, 12 rys., 1 tab., bibliogr. [14] poz. Lokalizacja elektroniczna(EJOR): <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056> ;
2. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 621-626, bibliogr. 13 poz. [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83);
3. Berenguel Manuel, Cirre Cristina M, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: Hierarchical control of a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 614-620, 3 rys., bibliogr. 9 poz. [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_82](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_82).
4. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: Some models for water distribution systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1988 vol. 21, nr 3, s. 257-269. LF,
5. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: Optimization algorithms of operative control in water distribution systems, *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1997 vol. 84, s.81-99, LF,

#### Prace z LM są następujące:

1. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: Directed cooperation in multihop wireless sensors network. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2010, vol. 56, nr 1, s. 7-11.
2. **Klempous Ryszard**: Determination of feasible set of solutions for mixed integer nonlinear optimization problem. *CASYS: International Journal of Computing Anticipatory Systems*. 2006, vol. 19, s. 123-134.
3. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Michał Berenguel Manuel: Diagnostyka procesu sterowania instalacją pozyskiwania energii słonecznej. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*. 2005, wyd. spec. 9, bis, s. 213-216).

#### Referaty konferencyjne:

1. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: Simulation, control and optimization problem in distribution networks-survey our results / I IFAC International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems, TiASWiK '02, Gdańsk 2002 : Gdańsk-Sobieszewo, June 19-21, 2002 / [Ed. by Kamil Konarczak, Dariusz Trawicki]. Gdańsk: Wydaw. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PGdań., 2002]. s. 1-12,
2. Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał P, Rozenblit Jerzy: An improvement of energy aware routing in wireless sensors network. W: *International Mediterranean Modelling Multiconference 2006*. [2nd European Modeling and Simulation Symposium. EMSS 2006], Barcelona, Spain, October 4-6, 2006 / Ed. by A. G. Bruzzone [i in.]. PIERA : LogiSim, cop. 2006. s. 599-604.
3. Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał: Methods of sensors localization in wireless sensor networks. W: *Raising expectations of computer-based systems. 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems. ECBS 2007. Proceedings, Tucson, Arizona, March 26-29, 2007 / Ed. by John Leaney, Jerzy W. Rozenblit, Jianfeng Peng. Los Alamitos [i in.] : IEEE Computer Society [Press], cop. 2007. s. 145-152.*

#### Raporty Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble:

1. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: Quelques proprietes asymptotiques de la solution d'un probleme de minimisation de gaspillages d'energie dans un reseau de distribution d'eau, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères). IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, R.R. 489, 1984 - 14 pages,
2. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères). IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, , R.R. 486, 1984 - 16 pages,

#### Rozdział w monografii:

Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Woda Marek, **Klempous Ryszard**, Chaczko Zenon: *Relation-based message routing in wireless sensor networks: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka : InTech, 2010. s. 127-145*

### 3. 2. 3. Wykaz prac składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie.

#### A) Wykaz prac składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie zawarty w „Wieloaspektowym podejściu do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” związanych z „Aspektami optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów”:

1. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**: *Smart water distribution system / Jan Nikodem, Ryszard Klempous. W: Cloud computing : ICIT 2013 : The 6th International Conference on Information Technology [Dokument elektroniczny] : May 8th-10th, 2013, Amman/Jordan / ed. by Ali Al-Dahoud. Amman : Al-Zaytoonah University of Jordan, 2013. s. 1-8,*
2. **Klempous Ryszard**: *Determination of feasible set of solutions for mixed integer nonlinear optimization problem. CASYS: International Journal of Computing Anticipatory Systems. 2006, vol. 19, s. 123-134,*
3. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *Zastosowanie łączny bezprzewodowych dla potrzeb diagnostyki serwisowej. W: Diagnostyka procesów przemysłowych. VI Krajowa konferencja naukowo-techniczna, Władysławowo, 15-17 września 2003 / Red. nauk. Zdzisław Kowalczyk. Gdańsk : Pomorskie Wydaw. Naukowo-Techniczne, cop. 2003. s. 403-408,*
4. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa, Ułasiewicz Jędrzej: *Simulation, control and optimization problem in distribution networks - survey our results/ W: I International Scientific and Technical Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems. TiASWiK '02, Gdańsk-Sobieszewo, June 19-21, 2002 / [Ed. by Kamil Konarczak, Dariusz Trawicki]. [Gdańsk: Wydaw. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PGdań., 2002]. s. 1-12,*
5. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *Modelowanie rozpyłów w nieliniowych sieciach przepływowych / W: Infrastruktura podziemna miast. VIII Konferencja naukowo-techniczna, [Wrocław, 28-29 listopada 2002]. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWroc., 2002. s. 174-184, (Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, ISSN 0324-9735; nr 19),*
6. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan: *Determination of energy losses and allocation in water distribution network. W: I International Scientific and Technical Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems. TiASWiK '02, Gdańsk-Sobieszewo, June 19-21, 2002 ,[Gdańsk : Wydaw. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PGdań., 2002]. s. 265-268,*
7. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Szlachcic Ewa: *Distribution in water supply system with limited consumption outflows / W: I International Scientific and Technical Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems. TiASWiK '02, Gdańsk-Sobieszewo, June 19-21, 2002 / [Ed. by Kamil Konarczak, Dariusz Trawicki]. [Gdańsk : Wydaw. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PGdań., 2002]. s. 269-275,*
8. Czemplik Anna, Jabłoński Andrzej, **Klempous Ryszard**: *Properties of fieldbus networks vs functionality of distributed control systems / W: Formal methods and tools for computer science. [Eight International Conference on Computer Aided Systems Theory and Technology]. EuroCAST 2001. Extended abstracts, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 13-19 February 2001 / Ed. by R. Moreno-Diaz and A. Quesada-Arencibia. Las Palmas de Gran Canaria : IUCTC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, cop. 2001. s. 130-135,*
9. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *Zastosowanie interfejsu CAN w automatyce / W: Diagnostyka procesów przemysłowych. V Krajowa konferencja naukowo-techniczna, Łągow Lubuski, 17-19 września 2001 / Red. nauk. Józef Korbicz, Andrzej Pieczyński. Zielona Góra: Oficyna Wydaw. PZielonogórs., [2001]. s. 389-392,*
10. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Rozenblit Jerzy: *The wireless data acquisition system for flood control and water management W: 4th IFAC International Symposium on Intelligent Components and Control Applications. SICCA 2000. Preprints. Asociacion Argentina de Control Automatico, Buenos Aires, 13-15 September 2000 / Ed. by A.T. Casucci. [B.m. : b.w.], cop. 2000, s. 255-258,*
11. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *Sociological aspects of data acquisition and processing Berlin [i in.] : Springer, cop. 2000. s. 302-306. (Lecture Notes in Computer Science, ISSN 0302-9743; vol.1798),  
Lokalizacja elektroniczna: [http://dx.doi.org/10.1007/10720123\\_27](http://dx.doi.org/10.1007/10720123_27)*
12. Czemplik Anna, Jabłoński Andrzej, **Klempous Ryszard**: *Multilayer attempt to create the automation process of gas mines W: Electrotechnological services for Africa. 1999 IEEE Africon. 5th Africon*



- Conference in Africa, Cape Town, South Africa, 28 September - 1 October 1999. Vol. 1. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 1999. s. 431-433,
13. Jabłoński Andrzej, **Klempous Ryszard**, Rumiński Jacek: *The automation structure of underground gas reservoirs* / W: *Electrotechnological services for Africa. 1999 IEEE Africon. 5th Africon Conference in Africa, Cape Town, South Africa, 28 September - 1 October 1999. Vol. 1. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 1999. s. 549-551*,
  14. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *Monitorowanie 1999 IEEE Africon. 5th Africon Conference in Africa, Cape Town, South Africa, 28 September - 1 October 1999. Vol. 1. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 1999. s. 421-423*,
  15. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *A data acquisition and processing system / systemów wodociągowych i kanalizacyjnych/ Rynek Instalacyjny. 1999 R. 7, nr 7, s. 17-20*,
  16. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *System automatycznej komunikacji radiowej dla potrzeb transmisji cyfrowej w procesie monitorowania systemów wodociągowych i kanalizacyjnych W: Technologia i automatyzacja systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. TiASWiK '99. Materiały III konferencji naukowo-technicznej, Stawiska, 23-25 czerwca 1999. [Gdańsk, Politechnika Gdańska., 1999]. s. 135-140*,
  17. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Optimization algorithms of operative control in water distribution systems / Journal of Computational and Applied Mathematics. 1997 vol. 84, s. 81-99, 1 rys*,
  18. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan: *Rozproszony system monitorowania pracy sieci dystrybucji gazu z wykorzystaniem łącz radiowych / W: Diagnostyka procesów przemysłowych. II Krajowa konferencja naukowo-techniczna, Łagów k. Zielonej Góry, 8-11 września 1997. [Zielona Góra : Wydaw. PZielonogórskiej., 1997]. s. 358-363*,
  19. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Supervisory control and data acquisition system for water distribution networks / W: Advanced technology in the environmental field. Proceedings of the IASTED International Conference, Gold Coast, Australia, May 7-9, 1996 / Ed. M. H. Hamza. Anaheim [i in.] : Acta Press, 1996. s. 32-34*,
  20. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan: *Simulation algorithms for operative control in water distribution systems / W: Advanced technology in the environmental field. Proceedings of the IASTED International Conference, Gold Coast, Australia, May 7-9, 1996 / Ed. M. H. Hamza. Anaheim [i in.] : Acta Press, 1996. s. 28-31*,
  21. **Klempous Ryszard**, Łysakowska Barbara, Nikodem Jan: *Supervisory control and data acquisition system for the gas flow networks Springer-Verlag, 1996. s. 530-538, (Lecture Notes in Computer Science , ISSN ; vol. 1030)*,  
Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0034787>
  22. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa: *Simulation algorithm for non-linear network model with substance accumulation / W: Computer applications in industry. Proceedings of the Fourth IASTED International Conference, Cairo, Egypt, December 4-6, 1995 / Ed. M. H. Hamza. Anaheim [i in.] : Acta Press, 1995. s. 75-78*,
  23. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Szlachcic Ewa: *Some numerical aspects of the gradient procedure for design of nonlinear transportation networks / Mathematical and Computers in Simulation. 1994, vol. 37, s. 29-35*,
  24. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan: *System approach to the water distribution problems. W: Cybernetics and systems '94. Proceedings of the Twelfth European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Vienna, Austria, 5-8 April 1994. Vol. 1/Ed. by Robert Trappl. Singapore [i in.]: World Scientific, 1994. s. 957-963*,
  25. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy: *Nonlinear transport network design / Journal of Computational and Applied Mathematics. 1991, vol. 35, nr 3, s. 269-275*,
  26. **Klempous Ryszard**, Kordecki Henryk, Nikodem Jan: *Some problems of construction and analysis of strategic communication networks, W: Problemy kompleksnoy avtomatizacii. Trudy cetvertoj mezdunarodnoj naucno-techniceskoj konferencii, Kiev, 17-20 oktjabrja 1990. Sekc. 5. Integrirovannye sistemy upravlenija i proektirovanija. Kiev : Kiev. Politech. Inst., 1990. s. 133-141*,
  27. **Klempous Ryszard**, Kordecki Henryk, Nikodem Jan: *Adaptation of the cross method for the dynamic flow simulation in the gas networks / W: 4es journees francophones sur la Logistique et les Transports. Colloque sur le Developpement des Sciences et Pratiques sur le Developpement des Sciences et Pratique de l'Organisation, Paris, [France]- 13 - 15 Decembre 1989. Paris : AFCET, 1989. s. 305-311*,
  28. **Klempous Ryszard**, Jan Nikodem, Jędrzej Ulasiewicz; *Simulation Model of High Pressure Gas Pipeline Networks; Editors Achim Sydow , Spyros G. Tzafestas , Robert Vichnevetsky , Systems Analysis Modelling Simulation II, Series Title: Advances in Simulation, Springer Verlag 1988, pp 216-219, DOI 10.1007/978-1-4613-8936-1\_43; Print ISBN 978-0-387-97093-6; Online ISBN 978-1-4613-8936-1*,

29. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: *Some models for water distribution systems / Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1988 vol. 21, nr 3, s. 257-269,
30. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Kuliszewski Mieczysław: *Gradientowe procedury identyfikacji parametrów sieci wodociągowych, W: V Konferencja nt. Sterowanie Systemem Wodno-Gospodarczym na Obszarze Aglomeracji Miejsko-Przemysłowej, [Rudy Raciborskie, 15-17 czerwiec 1987.]. Gliwice : PŚl., 1988. s. 121-128, 2 rys., 1 tabl., bibliogr. 5 poz., rez., sum. (Zeszyty Naukowe - Politechnika Śląska. Automatyka, ISSN ; z. 89) W serii gł.: nr 916,*
31. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Kuliszewski Mieczysław: *Sensitivity analysis of simulation problems in water distribution network / European Congress on Simulation, Prague, September, 1987. Vol.a. Prague : Czech. Acad. Sc., 1987. s. 293-297, bibliogr. 4 poz.,*
32. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Oprogramowanie systemu komputerowego sterowania i optymalizacji warunków pracy sieci wodociągowej miasta Przemysła W: INFOGRYF '86. Informatyka w Zarządzaniu Przedsiębiorstwem, [Kolobrzeg, 21.10-24.10.1986]. Zbiór referatów uczestników konferencji. Sekc. 2. Komputerowe systemy wspomagania decyzji. Szczecin, 1986. s. 112-116,*
33. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Mikrokomputerowy system optymalnego sterowania w czasie rzeczywistym siecią dystrybucji wody W: Sterowanie systemem wodno-gospodarczym na obszarze aglomeracji miejsko-przemysłowej. Materiały na IV Konferencję, Ustroń-Jaszowiec, 13-15 maja 1985. Gliwice : PŚl., 1985. s. 177-183. (Zeszyty Naukowe-Politechnika Śląska. Automatyka, ISSN ; z. 79) W serii gł.: nr 848,*
34. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: *Quelques proprietes asymptotiques de la solution d'un probleme de minimisation de gaspillages d'energie dans un reseau de distribution d'eau , Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères)|. IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, 1984 - 14 pages, R.R. Nr 486,*
35. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: *An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères) IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, 1984 - 16 pages, R.R. Nr 489.*

**A1) Wykaz prac niepublikowanych (raportów) związanych z „Aspektami optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów”:**

1. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Rozenblit Jerzy\*: *The wireless data acquisition system for flood control and water management Raporty Inst. Cybern. PWroc. 2000 Ser. PRE nr 70, 4 s.: bibliogr. 9 poz.,*
2. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Supervisory control and data acquisition system for water distribution networks. Pt. 2 / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1996 Ser. PRE nr 58, 4 s.: 4 rys., bibliogr. 3 poz.,*
3. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan: *Simulation algorithms for operative control in water distribution systems. Pt. 1 / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1996 Ser. PRE nr 57, 5 s.: 1 rys., bibliogr. 8 poz.,*
4. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Szlachcic Ewa: *Simulation algorithm for the water distribution network with limited consumption outflows / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1996 Ser. PRE nr 53, 13 s.: bibliogr. 13 poz.,*
5. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa: *Simulation algorithm for non-linear network model with substance accumulation Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1995 Ser. PRE nr 65, 10 s.: bibliogr. 10 poz.,*
6. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Szlachcic Ewa: *Identification methods in water distribution systems / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1994 Ser. PRE nr 64, 12 s.: bibliogr. 13 poz.,*
7. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Ulasiewicz Jędrzej: *An algorithm of operative control in water distribution systems / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1994 Ser. PRE nr 60, 12 s.: bibliogr. 10 poz.,*
8. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan: *An application of non-linear network model for pipeline accumulation control purpose / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1993 Ser. PRE nr 62, 7 s.: bibliogr. 10 poz.,*
9. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Simulation algorithm of water distribution network / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1993 Ser. PRE nr 63, 8 s.: bibliogr. 9 poz.,*
10. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan: *Systems approach to the water distribution problems : Pt. 2. An algorithm of operative control of water distribution systems /. Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1993 Ser. PRE nr 27, 4 s.: 1 rys., bibliogr. 9 poz.,*
11. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *System approach to the water distribution problems : Pt. 1. Simulation algorithm of water distribution network Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1993 Ser. PRE nr 26, 7 s.: 1 rys., bibliogr. 9 poz.,*

12. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Szlachcic Ewa: Ocena efektywności gradientowych procedur projektowania nieliniowych sieci komputerowych / Raporty Inst. Cybern. PWroc. 1992 Ser. PRE nr 41, 11 s. : bibliogr. 10 poz.,
13. **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: Symulacja przepływów w sieciach gazowych z uwzględnieniem zjawiska akumulacji / Raporty Inst. Cybern. PWr. 1988 Ser. PRE nr 22, 8 s. : bibliogr. 7 poz.,
14. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: Water distribution systems / Raporty Inst. Cybern. PWr. 1986 Ser. PRE nr 70, 11 s.: 2 rys., bibliogr. 9 poz.,
15. **Klempous Ryszard**, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: An algorithm for optimal control of pumping station based on aggregated model of water network. Raporty Inst. Cybern. PWr. 1986 Ser. PRE nr 57, 8 s. : 2 rys., 1 tabl., bibliogr. 8 poz.,
16. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan: Multilevel control of water distribution system / Raporty Inst. Cybern. PWr. 1986 Ser. PRE nr 56, 6 s.: bibliogr. 5 poz.,
17. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: An aggregation method of water distribution system for optimal control of water level in reservoir Raporty Inst. Cybern. PWr. 1985 Ser. PRE nr 90, 12 s.: 2 rys., bibliogr. 5 poz.,
18. Szlachcic Ewa, **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: Koncepcja opomiarowania i sterowania obiegiem wód kopalniano-technologicznych i hydrotransportu odpadów na terenie LGOM Raporty Inst. Cybern. PWr. 1985 Ser. SPR nr 6, 33 s. 9 rys., 2 tabl., bibliogr. 10 poz.,
19. Szlachcic Ewa, **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: Podstawowe metody i algorytmy sterowania złożonym systemem wodociągowym Raporty Inst. Cybern. PWr. 1984 Ser. SPR nr 14, 99 s.: 22 rys., 9 tabl., bibliogr. 14 poz.,
20. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: Badania symulacyjne i analityczne algorytmów optymalnego sterowania siecią wodociągowa w eksperymentalnym systemie wodno-gospodarczym Raporty Inst. Cybern. PWr. 1983 Ser. SPR nr 10, 113 s.: 46 rys., 15 tabl., bibliogr. 12 poz.,
21. Olesiak Marek, Kotowski Jerzy, Gawrych-Żukowski Andrzej, **Klempous Ryszard**, Kordecki Henryk, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: Opracowanie programu wspomagającego decyzje dyspozytorskie w zakresie optymalnego wykorzystania zbiorników sieciowych w złożonych systemach wodociągowych / Raporty Inst. Cybern. PWr. 1982 Ser. SPR nr 25, 52 s.: 18 rys., 5 tabl., bibliogr. 9 poz.,
22. Stanicki Tadeusz, Caban Jan, Gawrych-Żukowski Andrzej, **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: Opracowanie modelu układu rozprowadzania wody w aglomeracji miejsko-przemysłowej do komputerowo - wspomaganego sterowania systemem. Raporty Inst. Cybern. PWr. 1980 Ser. SPR nr 52, 144 s.

**B) Wykaz prac składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie z „Wieloaspektowym podejściu do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” związanych z „Aspektami modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych”:**

1. Cirre Cristina M, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**: Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717, 12 rys., 1 tabl., bibliogr. [14] poz.,
2. Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>,
3. Berenguel Manuel, Cirre Cristina M, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: Hierarchical control of a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 614-620, 3 rys., bibliogr. 9 poz.,
4. Lokalizacja elektroniczna [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_82](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_82),
5. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 621-626, bibliogr. 13 poz.,
6. Lokalizacja elektroniczna [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83)
7. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: Sterowanie systemem pozyskiwania energii odnawialnej opartym na parabolicznych kolektorach słonecznych: Systemy sterowania. Praca zbiorowa pod red. Włodzimierza Greblickiego i Czesława Smutnickiego. Warszawa: WKŁ, 2005. s. 181-190,
8. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: Contribution to the control of a distributed solar collector field. W: *Cast and tools for robotics, vehicular and communication systems. 10th International Workshop on Computer Aided Systems Theory. EuroCAST 2005. Extended abstracts, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, [7-*

- 11] February 2005 / A. Quesada-Arencibia, R. Moreno-Diaz jr., J.-C. Rodrigues (eds). *Las Palmas de Gran Canaria : IUCTC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, cop. 2005. s. 325-326,*
9. **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto: *Data driven methods and data analysis of a distributed solar collector field. W: APLIMAT. 4th International conference, Bratislava, February 1-4, 2005. Pt. 2 / [Ed. M. Kovacova]. Bratislava : FX, [2005]. s. 205-212,*
  10. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: *Data analysis of a distributed solar collector field. W: Cast and tools for robotics, vehicular and communication systems. 10th International Workshop on Computer Aided Systems Theory. EuroCAST 2005. Extended abstracts, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, [7-11] February 2005 / A. Quesada-Arencibia, R. Moreno-Diaz jr., J.-C. Rodrigues (eds). Las Palmas de Gran Canaria : IUCTC Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, cop. 2005. s. 15-16,*
  11. Maciejewski Henryk, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan: *Badanie własności systemów generacji energii odnawialnej za pomocą technik OLAP i Data Mining. W: Inżynieria komputerowa. Praca zbiorowa pod red. Wojciecha Zamojskiego. Warszawa : WKŁ, 2005. s. 470-481,*
  12. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Michał, Berenguel Manuel: *Diagnostyka procesu sterowania instalacją pozyskiwania energii słonecznej. Pomiary, Automatyka, Kontrola. 2005, wyd. spec. 9, bis, s. 213-216.*

**C) Wykaz prac składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie zawarty w „Wieloaspektowym podejściu do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” związanych z „Analizą metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN)”:**

1. **Klempous Ryszard**: *Collective behavior in Wireless Sensor Networks / Ryszard Klempous. Acta Polytechnica Hungarica. 2014, vol. 11, nr 4, s. 101-118,*  
Lokalizacja elektroniczna: <http://www.uni-obuda.hu/journal/Klempous50.pdf>,
2. Nikodem Jan, Chaczko Zenon, Nikodem Maciej, **Klempous Ryszard**: *Smart and cooperative neighbourhood for spatial routing in wireless sensor networks / Ladislav Madarász, Jozef Živčák eds. Berlin; Heidelberg: Springer, cop. 2013 (dr. 2012). s. 167-184, (Topics in Intelligent Engineering and Informatics; ISSN 2193-9411, 2) Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30668-6>,*
3. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Chaczko Zenon: *Neighbors cooperation in WSN based on collective decisions. W: INES 2012 : IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems proceedings, June 13-15, 2012, Lisbon, Portugal. [Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2012. s. 139-143,*
4. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Chaczko Zenon: *Enhanced performance of spatial routing in WSN based on LQI metrics. W: 1st Australian Conference on the Applications of Systems Engineering, ACASE consolidated extended abstracts, 6th to 8th February 2012, Sydney, Australia. Sydney: University of Technology, 2012. s.1 08-114, Lokalizacja elektroniczna: [http://crin.eng.uts.edu.au/apcast/uploads/ACASE\\_2012\\_ConferenceExtendedAbstract.pdf](http://crin.eng.uts.edu.au/apcast/uploads/ACASE_2012_ConferenceExtendedAbstract.pdf),*
5. Nikodem Jan, Woda Marek, Nikodem Maciej, **Klempous Ryszard**: *Energy awareness spatial routing in wireless sensors network. W: Advances in information technology from artificial intelligence to virtual reality [ / ed. by Al-Dahoud Ali. [B.m.] : UBICC Publisher, cop. 2011. s. 112-127, 11 rys., 2 tab., bibliogr. 9 poz.*  
Lokalizacja elektroniczna:  
[http://www.ubicc.org/files/pdf/Advances%20in%20Information%20Technology%20from%20AI%20to%20Virtual%20Reality\\_629.pdf](http://www.ubicc.org/files/pdf/Advances%20in%20Information%20Technology%20from%20AI%20to%20Virtual%20Reality_629.pdf),
6. Nikodem Jan, Chaczko Zenon, Nikodem Maciej, **Klempous Ryszard**, Wickramasooriya Ruckshan: *Combating security threats via immunity and adaptability in cognitive radio networks. Recent advances in intelligent engineering systems / János Fodor, Ryszard Klempous, Carmen Paz Suárez Araujo (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. s. 221-242, (Studies in Computational Intelligence; ISSN 1860-949X, vol.378): <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23229-9>,*
7. Nikodem Jan, Nikodem Maciej, **Klempous Ryszard**, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Neighborhood concept for modeling an adaptive routing in wireless sensor network. W: The 23rd European Modeling & Simulation Symposium, EMSS 2011 Rome, Italy, September 12-14, 2011 / ed. by Agostino Bruzzone [i in.]. Genova : DIPTM Università di Genova, cop. 2011. s. 703-708,*
8. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Chaczko Zenon: *Multi-hop and directed routing based on neighborhood cooperation in WSN. W: INES 2011: 15th International Conference on Intelligent*

- Engineering Systems : proceedings, June 23-25, 2011, Poprad, Slovakia. [Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2011,*
9. Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Woda Marek, **Klempous Ryszard**: *Spatial and energy distributed routing in wireless sensor network. The 5th International Conference on Information Technology, ICIT 2011: Amman, Jordan, May 11-13, 2011 / ed. Al-Dahoud Ali. Amman : Al-Zaytoonah University of Jordan, 2011. s. 50-55,*
  10. Chaczko Zenon, Wickramasooriya Ruckshan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan: *Security threats in cognitive radio applications. W: 14th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2010, INES 2010: proceedings, Las Palmas of Gran Canaria, Spain, May 5-7, 2010: IEEE, cop. 2010. s. 209-214,*
  11. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Wireless sensors network simulator for modeling relation based communication activity. W: Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications, IB2Com 2010 [Malaga, Spain, 15-17 December 2010. [Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2010. [6] s.,  
Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1109/IB2COM.2010.5723603>,*
  12. Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Woda Marek, **Klempous Ryszard**, Chaczko Zenon: *Relation-based message routing in wireless sensor networks. W: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka : InTech, 2010. s. 127-145, bibliogr. 10 poz,*
  13. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Directed cooperation in multihop wireless sensors network. International Journal of Electronics and Telecommunications. 2010, vol. 56, nr 1, s. 7-11,*
  14. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Multihop communication in wireless sensors network based on directed cooperation. W: BROADBANDCOM'09, July 15-18, 2009, Wrocław, Poland selected papers on Broadband Communication, Information Technology & Biomedical Application / [eds Tomasz Janiczek i in.]. Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009. s. 239-241,*
  15. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Modeling a spatial communication activity in wireless sensors network. W: The International Workshop on Modeling & Applied Simulation, MAS 2009, September 23-25, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain / ed. by Osman Balci [i in.]. La Laguna: ISAATC, cop. 2009. s. 50-55,*
  16. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek: *Directed communication in Wireless Sensor Network based on Digital Terrain Model. W: 2009 2nd International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (LINDI), Linz, Austria, 10-11 September 2009 / [Witold Jacak i in. eds.]. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2009. s. 87-91,*
  17. Chaczko Zenon, Klempous Ryszard, Nikodem Jan, Szymański Jan: *Applications of cooperative WSN in homecare systems. W: Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, BroadCom 2008 : proceedings, Pretoria, South Africa, 23-26 November 2008 / eds Johnson I Agbinya [i in.]. Los Alamitos: IEEE Computer Society [Press], cop. 2008. s. 215-220.*

Od roku 1981 do 2014 opublikowałem łącznie 153 prace (p. Zał 3. i 3.1.), wśród których znajduje się 40 artykułów i rozdziałów w książkach. Uczestniczyłem w redagowaniu pięciu książek i aktualnie również uczestniczę w redagowaniu jednej książki.

Część prac tworzy cykl przeszło 60 publikacji powiązanych tematycznie skupiający się na praktycznym wykorzystaniu wieloaspektowego podejścia do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów przy zastosowaniu technik agregacji i dekompozycji.

### **3.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników prac stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego**

Do obrony doktoratu (1980r.) zajmowałem się podstawami teoretycznymi i praktycznymi budowy modeli procesów oraz ich symulacją i optymalizacją. Zauważyłem konieczność rozszerzenia badania tych problemów i dlatego tematykę badawczą związaną z „*Wieloaspektowym podejściem do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów*” rozpocząłem intensyfikować po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych, tj. od 1980 r.

Wieloaspektowe podejście przybliży i umożliwi rozwiązywanie ważnych problemów w kompleksowy i zintegrowany sposób, począwszy od technologii, modelowania i projektowania systemu a skończywszy na automatyzacji, sterowaniu i podejmowaniu decyzji. W omawianym okresie moje badania zarówno teoretyczne jak i aplikacyjne zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów obejmowały obszary (lecz nie były ograniczone do):

- Modelowania symulacji procesów.
- Analizy aspektów zużycia energii w procesach technologicznych.
- Struktur i algorytmów procesów sterowania.
- Struktur i algorytmów zarządzania operacyjnego.
- Estymacji zmiennych fizycznych i parametrów modelu.
- Automatykacji procesów technologicznych.
- Systemów wspomagania podejmowania decyzji i zarządzania.
- Systemów komunikacyjnych i informatycznych.

Jako osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego z zakresu tej tematyki badawczej wskazuję wyniki badań uzyskane w systemach dystrybucji mediów, w rozproszonych systemach solarnych i w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks). Punktem ciężkości badania problemów modelowania, symulacji, sterowania i optymalizacji hierarchicznych procesów były techniki dekompozycji i agregacji.

Modelowanie dotyczy zarówno statycznych i dynamicznych modeli procesów. Ilustrowane to będzie na przykładzie systemów dystrybucji mediów, systemów pozyskiwania energii słonecznej oraz bezprzewodowych sieci sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks).

Sterowanie i Optymalizacja to krótko- i długoterminowe planowanie pracy analizowanych systemów (dystrybucji mediów, pozyskiwania energii słonecznej oraz WSN) z uwzględnieniem warunków systemowych i ograniczeń technologicznych.

Symulacja to tworzenie oprogramowania symulacyjnego dla potrzeb weryfikacji i poprawności wytworzonych modeli oraz algorytmów sterowania i optymalnego planowania pracy w wyszczególnionych wyżej systemach. Równolegle opracowane algorytmy i modele umożliwiają prognozowanie dostępnych zasobów np. energii słonecznej w systemach solarnych, zasobów i prognoz zużycia medium w systemach dystrybucji mediów, zasobów energii w WSN.

**Technologia IT** musi być równocześnie projektowana i uruchamiana. Służy do weryfikacji opracowanych modeli procesów. Zaawansowana baza danych umożliwi analizę gromadzonych w długim okresie czasu w trybie on-line w oparciu o nowoczesne narzędzia informatyczne (np. OLAP – Online Analytical Processing czy DM – Data Mining).

**Przedstawiony cykl publikacji powiązanych tematycznie stanowi osiągnięcie polegające na dogłębnej charakterystyce problemów modelowania, sterowania, optymalizacji oraz symulacji procesów w ramach tematyki badawczej „Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”.**

Moim wkładem w rozwój nauki, a w szczególności automatyki i robotyki, są wyniki uzyskane w dziedzinie modelowania, optymalizacji i lokalizacji procesów; w szczególności oryginalne i efektywne połączenie prac podstawowych z zastosowaniami.

W cyklu przeszło 60 publikacji powiązanych tematycznie główną uwagę zwrócono na praktyczne wykorzystanie wieloaspektowego podejścia do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów przy zastosowaniu technik agregacji i dekompozycji.

Wyróżniłem trzy grupy publikacji połączone tematyką: optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów; modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych oraz analizą metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks).

Prace z dziedziny IT są umieszczone w stosownych załącznikach, jednak nie będę się do nich praktycznie odnosił przy omawianiu osiągniętych wyników. Stanowią one potwierdzenie faktu, że prezentowane problemy były rozpatrywane również w aspekcie praktycznym.

Prace trzech wyżej wymienionych grup tematycznych:

- Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów;
- Aspekty modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych;
- Analiza metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks);

stanowią **cykl publikacji powiązanych tematycznie:**

*„Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”.*

W analizowanej tematyce wspólną cechą były zagadnienia budowy modeli procesów, symulacja procesów związanych tymi modelami oraz budowa algorytmów optymalizacji.

Ze względu na występującą w omawianych procesach dużą złożoność i duży wymiar stosowano techniki agregacji oraz dekompozycji. Podstawowe problemy optymalizacyjne były związane z minimalizacją zużycia energii elektrycznej lub też z optymalizacją jej wytwarzania.

Cykl ten jest osiągnięciem naukowym spełniającym warunki art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.).

Uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład do dyscypliny naukowej Automatyka i Robotyka. Treść cyklu publikacji powiązanych tematycznie pt. „Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” wskazanego jako osiągnięcie, zostanie szczegółowo omówiona w dalszej części autoreferatu.

### **3.3.1. „Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów” - Główne cele i najważniejsze osiągnięcia badań**

Liczba publikacji, związanych z tymi zagadnieniami obejmuje 35 pozycji (p. 3.2.3. A) oraz (Załącznik 4.1.). Są to artykuły opublikowane w czasopismach z LF(7), referaty krajowe (13) i zagraniczne (15). Oprócz tego powstały 22 niepublikowane raporty (p. 3.2.3. A1 i p. Załącznik 3) związane z tą tematyką. Głównym przedmiotem zainteresowania były szeroko rozumiane problemy budowy hierarchicznych modeli, optymalizacji i symulacji w sieciach dystrybucji, głównie wody i gazu. Publikacji związanych z systemami dystrybucji w sieciach wodnych jest 20 (w tym 5 z LF), a 5 prac analizuje zagadnienia Technologii IT w tych sieciach.

Pozostałe prace związane są z analogicznymi problemami w sieciach dystrybucji gazu (6) oraz z problemami w innych sieciach (4).

Ze względu na uzyskane wcześniejsze wyniki, zdecydowałem się zilustrować najpierw „**Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów**” w ramach cyklu publikacji powiązanych tematycznie „**Wieloaspektowym podejściem do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów**” na przykładzie Systemów Dystrybucji Wody.

Z Załącznika 4.1. (LISTA PUBLIKACJI „ASPEKTY OPTYMALIZACJI I SYMULACJI W SIECIACH DYSTRYBUCJI MEDIÓW”) wyodrębniłem sześć (6) najbardziej reprezentatywnych publikacji, powstałych w latach 1984 - 2002, jako zawierające najważniejsze osiągnięcia w rozpatrywanym obszarze Systemów Dystrybucji Wody.

W nawiasie podano procentowy wkład habilitanta.

Są to:

1. **Klempous Ryszard [40%]**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: *Quelques proprietes asymptotiques de la solution d'un probleme de minimisation de gaspillages d'energie dans un reseau de distribution d'eau, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères)*. IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, R.R. 489, 1984 - 14 pages,
2. **Klempous Ryszard [40%]**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: *An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères)*. IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, , R.R. 486, 1984 - 16 pages,
3. **Klempous Ryszard [30%]**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: *Some models for water distribution systems. Journal of Computational and Applied Mathematics. 1988 vol. 21, nr 3, s. 257-269. LF,*
4. **Klempous Ryszard [30%]**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: *Optimization algorithms of operative control in water distribution systems, Journal of Computational and Applied Mathematics. 1997 vol. 84, s.81-99, LF,*
5. **Klempous Ryszard**: *Determination of feasible set of solutions for mixed integer nonlinear optimization problem. CASYS: International Journal of Computing Anticipatory Systems. 2006, vol. 19, s. 123-134,*
6. **Klempous Ryszard[50%]**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: *Simulation, control and optimization problem in distribution networks-survey our results / I IFAC International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems, TiASWiK '02, Gdańsk 2002 : Gdańsk-Sobieszewo, June 19-21, 2002 / [Ed. by Kamil Konarczak, Dariusz Trawicki],Gdańsk: Wydaw. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PGdań., 2002]. s. 1-12.*

Listę tych pozycji literaturowych zamieściłem w p.3.2.3 (A oraz A1) oraz w Zał. 3, a kopie są umieszczone w Zał. 4.1.

Wyróżniona lista raportów:

1. Szlachcic Ewa, **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: *Podstawowe metody i algorytmy sterowania złożonym systemem wodociągowym* / Ewa Szlachcic [i in.]. *Raporty Inst. Cybern. PWr. 1984 Ser. SPR nr 14, 99 s.*,
2. **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: *Badania symulacyjne i analityczne algorytmów optymalnego sterowania siecią wodociągową w eksperymentalnym systemie wodno-gospodarczym* / Ryszard Klempous [i in.]. *Raporty Inst. Cybern. PWr. 1983 Ser. SPR nr 10, 113 s.*,
3. Olesiak Marek, Kotowski Jerzy, Gawrych-Żukowski Andrzej, **Klempous Ryszard**, Kordecki Henryk, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: *Opracowanie programu wspomagającego decyzje dyspozytorskie w zakresie optymalnego wykorzystania zbiorników sieciowych w złożonych systemach wodociągowych* / Marek Olesiak [i in.]. *Raporty Inst. Cybern. PWr. 1982 Ser. SPR nr 25, 52 s.*

Tematyką modelowania, optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji wody zajmowałem się w Instytucie Cybernetyki Technicznej PWr w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych, częściowo w ramach projektu "Theory of Control and Optimization of Continuous Systems and Discrete Processes" supported by the Scientific Program RP.I.02.

W roku 2002, wspólnie z Katedrą Automatyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, współorganizowałem konferencję **TiASWiK'02 - Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water - 1st IFAC Conference Gdansk – Sobieszewo, Poland, June 19-21, 2002**. Konferencja ta została zorganizowana jako *IFAC I International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems*. ([http://www.ely.pg.gda.pl/ziswdis/www\\_eia\\_ziswdis\\_oferta/page\\_042.htm](http://www.ely.pg.gda.pl/ziswdis/www_eia_ziswdis_oferta/page_042.htm)).

Była to doskonała okazja dla mnie jak i pozostałych uczestników projektów w zakresie dystrybucji w sieciach wodnych do podsumowania efektów wspólnych prac.

Według opinii Prof. M. Brdysia (Chairman konferencji):

*„Research teams or collaborating research groups presented four high quality plenary papers covering broad topics in the field and addressing both the state of the art and new proposals. Professor Ryszard Klempous addressed simulation, control and optimisation problems in drinking water distribution results focusing on the results obtained by Group from Wrocław University of Technology.”*

Na tej konferencji podsumowane zostały osiągnięcia moje i członków zespołu Instytutu Cybernetyki Technicznej PWr realizującego tę tematykę w latach 1980 – 2002. Wygłoszono pięć referatów, w tym jeden plenarny.

Jako osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego z zakresu tej tematyki badawczej wskazuję wyniki badań opisane w referacie plenarnym Konferencji „1st IFAC Conference Gdansk – Sobieszewo, Poland, June 19-21, 2002”, dwóch artykułach opublikowanych w *Journal of Computational and Applied Mathematics* (czasopismo z JCR), dwóch Raportach *Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble*, *IMAG (Saint Martin d'Hères)* oraz artykule w *CASYS: International Journal of Computing Anticipatory Systems* (p. Zał.4.1). Wyodrębniłem trzy raporty powstałe w latach 1982 – 1984.

Referat plenarny *“Simulation, control and optimization problem in distribution networks - survey our results”* wygłoszony na I International Scientific and Technical Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems. TiASWiK '02 zawiera posumowanie kilkunastoletnich prac realizowanych w tym obszarze.

Oprócz charakterystyki problemów modelowania, sterowania, optymalizacji oraz symulacji w systemach dystrybucji wody zawiera również część poświęconą IT. W części tej zawarta jest propozycja hierarchicznego systemu sterowania, systemu akwizycji i transmisji danych.

W pracy tej rozpatruje się model matematyczny systemu i jego elementów. Następnie przedstawiono wielopoziomowe podejście do problemu sterowania optymalnego w systemie dystrybucji wody wykorzystującego techniki agregacji. W tym celu opisano algorytm symulacji sieci oraz algorytm wyznaczający sterowania pracą zespołów pompowych. W efekcie zaprezentowany jest algorytm sterowania operacyjnego systemu dystrybucji wody. Głównym celem systemu dystrybucji wody jest spełnienie wymagań odbiorców, co jest realizowane przez dostarczenie odpowiedniej ilości wody o odpowiednich parametrach w określonych przedziałach czasowych. Sieć składa się z rurociągów



łączących źródła (np. stacje pomp) z odbiorcami. Wielopoziomowa struktura systemu sterowania była wielokrotnie dyskutowana, m. inn. w pracach: [B. Coulbeck, M. Sterling, *Optimized control of water distribution systems, Proc. IEEE, vol. 122, No. 2, 1978, 1039-1044*; Brdys, M.A. and Tatjewski, P. (2005) *Iterative Algorithms for Multilayer. Optimizing Control. Imperial College Press/World*, R. Klempous, J. Kotowski, J. Nikodem, *System approach to the water distribution problems, Proc. 12th European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Vienna, Austria, 1994, pp. 957-963*; R. Klempous, J. Kotowski, J. Nikodem, *Supervisory control and data acquisition system for the water distribution networks, Proc. IASTED Internat. Conf., Gold Coast, Australia, 1996, pp. 32-34*].

System dystrybucji jest przeznaczony do dostarczenia wody ze stacji pomp do odbiorców przez sieć rurociągów składającą się z odpowiednich elementów: stacji pomp, zasuw, zbiorników sieciowych. Najczęściej stosowanym kryterium optymalizacji jest minimalizacja kosztów.

Założono, że w rozpatrywanym modelu systemu dystrybucji wody podstawowym kryterium optymalizacji jest minimalizacja kosztów zużycia energii elektrycznej, zgodnie z sugestiami prac:

- A.A. Piervozvanski, *Mathematical Models in Production Processes, Izdatelstwo Nauka, Moscow, 1975*;
- J. Nikodem, J. Ulasiewicz, *Generalization of the Kelley's algorithm to problems with nonconvex set of feasible solutions, Archiwum Automatyki i Telemekhaniki 33 (I) (1988) 105-115*;
- J. Ulasiewicz, *Minimal energy control in nonlinear distribution system by network model aggregation method, PhD Dissertation, Institute of Technical Cybernetics, Wrocław, Poland (1984)*.

Proponowany system sterowania posiada trójpoziomą strukturę:

- **Poziom pierwszy** to poziom sterowania bezpośredniego zespołami pompowymi, zasuwami, ciśnieniami i przepływami w sieci. Wyznaczana jest tu liczba pracujących pomp oraz wielkości zasuw.
- Na **drugim poziomie** są wyznaczane wielkości ciśnień i wypływów ze stacji pomp. Zapewnia to spełnienie wymagań odbiorców. Wielkości te otrzymuje się jako efekt minimalizacji kosztów energii elektrycznej. W rezultacie następuje współpraca między stacjami pomp a zbiornikami.
- Na wyższym, **trzecim poziomie** wyznaczony jest harmonogram napełniania zbiorników sieciowych oparty o prognozowane zapotrzebowanie wody przez odbiorców oraz o parametry zagregowanego systemu dystrybucji. Algorytm taki zapewnia spełnienie żądań odbiorców oraz zapewnia też minimalizację kosztów energii elektrycznej. Zakłada się, że ceny energii zmieniają się w ciągu doby.

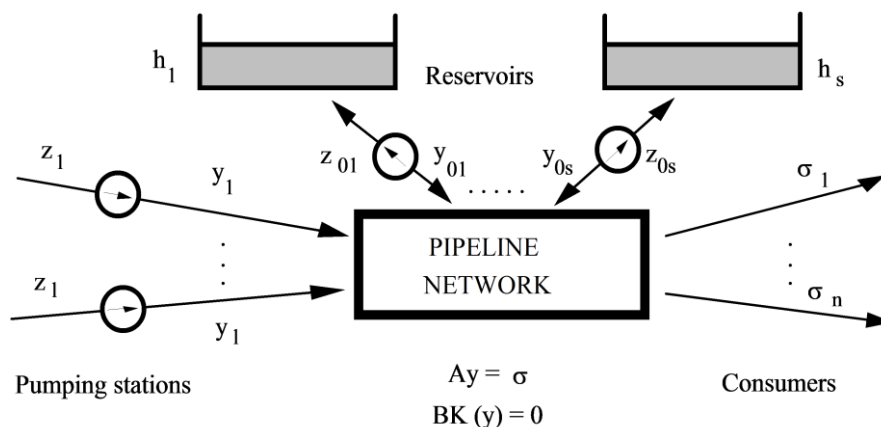
Główne wyniki badań odnoszą się do drugiego poziomu omawianej struktury systemu. Celem tego poziomu jest utrzymanie systemu dystrybucji wody w optymalnym zakresie pracy, przy założeniu, że spełnione są potrzeby odbiorców.

### 3.3.1.1. Opis modelu systemu

Model matematyczny sterowania optymalnego sieci dystrybucji wody musi uwzględnić następujące elementy:

- strukturę i topografię sieci dystrybucji,
- nieliniowe charakterystyki stacji pomp i sieci dystrybucji,
- dynamikę zbiorników sieciowych,
- zmienne ceny energii elektrycznej,
- stochastyczne potrzeby odbiorców.

W rezultacie uzyskuje się wielowymiarowy, stochastyczny, dynamiczny model systemu. Z tego powodu oraz ze względu na wymiar jak i nieliniowość, symulacja, sterowanie i optymalizacja w takim systemie nie wydaje się być możliwa [p. np. Coulbeck, B.; Sterling, M. J H, *Optimised control of water distribution systems, „Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, vol.125, no.10, pp.1039, 1044, October 1978*; Cohen, G. (1962), *Optimal control of water supply networks, pp. 251-276, In: S.G. Tzafestas (Ed.), Optimization and Control of Dynamic Operational Research Models. North-Holland Amsterdam*; Mietek A. Brdys, B. Ulanicki, *“Operational control of water systems: structures, algorithms, and applications”, Prentice Hall 1994, University of Michigan, ISBN0136389740, 9780136389743*].

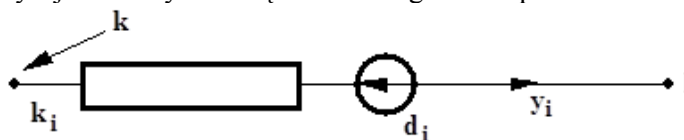


Rys.1 Struktura systemu dystrybucji wody.

Zaproponowano model systemu dystrybucji wody, uwzględniający jak na Rys. 1: strukturę sieci;

- model matematyczny stacji pomp,
- model zbiorników sieciowych,
- model potrzeb odbiorców.

Wymienione powyżej elementy zostaną teraz szczegółowo opisane.



where

- $y_i$  is the flow in the "I" arc of the network
- $k_i$  is the resistance of "I" water pipe segment
- $d_i$  is the difference of height of the geodesic points

Rys. 2. Elementy łuku sieci dystrybucji wody.

Zaproponowano uproszczony model systemu.

Niech  $l$  będzie liczba stacji pomp. Zakładamy, że każda stacja pomp zawiera  $\bar{z}_i$  pomp o identycznej charakterystyce. Stacja pobiera energię elektryczną wg poniższego wzoru..

$$P(y) = \alpha + \beta \cdot y \quad \alpha, \beta \geq 0 \quad (1)$$

Zależność ta łączy pobieraną energię  $P$  z wypływem wody  $y$ .

W ogólnym przypadku uzyskuje się poniższe zależności:

$$P_i(y_i, z_i) = \alpha_i \cdot z_i + \beta_i \cdot y_i \quad i = 1, \dots, l \quad (2)$$

Są prawdziwe dla stacji pomp, jeśli uruchomionych jest  $z_i$  pomp, a sumaryczny wypływ to  $y_i$ . Przez  $H_i$  oznaczamy charakterystykę pracy stacji pomp:

$$H_i(y_i, z_i) = H_i^o - G_i \cdot \left( \frac{y_i}{z_i} - y_i^o \right)^2 \quad i = 1, \dots, l \quad (3)$$

będących zależnościami między liczbą załączonych pomp  $z_i$ , wypływem  $y_i$  i ciśnieniem wody na wyjściu stacji pomp  $H_i$ .

We wzorze (3) wielkości  $H_i, G_i > 0$  oraz  $0 \leq z_i \leq \bar{z}_i$ .

Całkowity wypływ wody ze stacji pomp jest ograniczony ze względów technologicznych zależnością:

$$z_i \cdot \underline{y}_i \leq y_i \leq z_i \cdot \bar{y}_i \quad i = 1, \dots, l \quad (4)$$

Gdzie  $\underline{y}_i$  i  $\bar{y}_i$  oznaczają odpowiednio minimalną i maksymalną dopuszczalną wielkość wypływu.

Niech  $v_i(y_i)$  oznacza pożądaną wielkość ciśnienia na wyjściu stacji pomp „i”. Wyływ  $y_i$  może być realizowany, jeśli zachodzi:

$$H_i(y_i, z_i) \geq v_i(y_i) \quad i = 1, \dots, l \quad (5)$$

Różnice ciśnień  $H_i(y_i, z_i) - v_i(y_i)$  mogą być kompensowane, w razie potrzeby, ustawieniem zasuw regulacyjnych. Każdy łuk (odcinek) „i” sieci dystrybucji jest opisywany przez wielkość przepływu  $y_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ . Różnicę ciśnień  $x_i$  między dwoma końcami łuku opisuje poniższy wzór:

$$x_i = k_i \cdot y_i^2 \cdot \text{sgn}(y_i) + d_i \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

Gdzie  $d_i$  jest różnicą wysokości geodezyjnej łuku a  $k_i$  jest opornością hydrauliczną łuku sieci. Pełny opis praw fizyki w sieci dystrybucji wynika z praw Kirchhoffa. Pierwsze Prawo Kirchhoffa:

$$A \cdot y = p \quad (7)$$

Gdzie  $y \in R^n$  a  $p$  jest wektorem wymagań odbiorców,  $A = [a_{ij}]$  jest macierzą incydencji rzędu  $[m \times n]$ ,  $m$  jest liczbą węzłów a  $n$  jest liczbą łuków w sieci

Drugie Prawo Kirchhoffa:

Gdzie  $B$  jest macierzą oczkową a  $x \in R^n$  jest wektorem różnicy ciśnień.

$$B \cdot x = 0 \quad (8)$$

### 3.3.1.2. Algorytm symulacji sieci dystrybucji wody

Jednym z najważniejszych problemów pojawiających się w zagadnieniach dystrybucji jest wyznaczenie ciśnień i przepływów sieci wodociągowej.

Ze względu na interaktywność algorytmu koniecznym jest wielokrotne rozwiązywanie problemu (6)–(8). Dla zmieniających się wartości  $y_i, i = 1, \dots, l$  znane są algorytmy do wyznaczania przepływów i ciśnień w sieciach dystrybucji wody, jak np. [G. Cohen, *Optimal control of water supply networks*, in: S.G. Tzafestas (Ed.), *Optimization of Dynamics Operational Research Models*, North-Holland, Amsterdam, 1982, pp. 251-276, J. Kotowski, M. Olesiak, *The optimization of energy wastes in the water complex-supply systems*, Proc. Sixth IFAC/IFIP Intemat. Conf. of Digital Computer Applications to Process Control, Diisseldorf, 1980, pp. 386–395, Z. Mahjoub, *Contribution d'etude l'optimization des reseaux mailles*, These d'Etat-Informatique-Mecanique des Fluides, Institute Nationale de Toulouse'76, 1983, S. Miyaoka, M. Funubashi, *Optimal control of water distribution systems by network flow theory*, IEEE Trans. Automat. Control AC-29 (4) (1984) 303-311]. Zaproponowano oryginalną metodę opartą na teorii sieci przepływowych. Dla zadanych wielkości  $y_i, i = 1, \dots, l$  równania (6) - (8) mogą być przekształcone do problemu minimalizacji strat energii w sieciach dystrybucji wody. Opracowany w tym celu algorytm jest przeznaczony do rozwiązywania zadania optymalizacji statycznej przy obecności ograniczeń liniowych w postaci:

$$f(y) = \sum_{i=1}^n f_i(y_i) \quad (9)$$

przy

$$A(y) = p \quad (10)$$

Funkcja celu w (9) jest interpretowana jako moc tracona w rozpatrywanej sieci dystrybucji wody. Jej składowe są definiowane poniżej

$$f_i(y_i) = k_i \cdot y_i^3 \cdot \text{sgn}(y_i) + d_i \cdot y_i \quad (11)$$

Wzór (11) wynika z prawa Bernoulli'ego.

Zauważmy, że

$$f_i(y_i) = x_i y_i \quad (12)$$

lub

$$f(y) = x^T y \quad (13)$$

Algorytm zaproponowany do rozwiązywania zadania (9) - (10) składa się z trzech podstawowych części. Część pierwsza polega na transformacji wyjściowego zadania do zadania optymalizacji bez

ograniczeń. Część druga związana jest z wyznaczeniem kierunku poszukiwań. W części trzeciej wyznaczone zostaje minimum w zadanym kierunku.

### 3.3.1.2.1 Transformacja modelu sieci dystrybucji wody

Wyjściowy problem (9–10) może zostać zastąpiony przez równoważny problem optymalizacji statycznej bez ograniczeń w postaci:

$$f(B^T \cdot y_I + D \cdot p) \rightarrow \min \quad (14)$$

Wymiar problemu (14), czyli liczba składowych wektora  $y_I$  jest różnicą między liczbą zmiennych a liczbą ograniczeń w wyjściowym problemie (9 - 10) oznaczamy przez  $r$ . Stosownie do (9 - 10) funkcja celu problemu zredukowanego jest ściśle wypukła i dwukrotnie różniczkowalna. Można pokazać, że jej gradient (14) oraz Hesjan wyraża się następująco:

$$b = B \cdot \nabla f(y) \quad (15)$$

$$H = B \cdot \Lambda \cdot B^T \quad (16)$$

gdzie  $\Lambda$  jest macierzą diagonalną o postaci:

$$\Lambda = \text{diag} \{6k_i | y_i; i = \overline{1, n}\} \quad (17)$$

Następne części algorytmu są procedurą wyznaczania kierunku poszukiwań oraz procedurą wyznaczania minimum w danym kierunku **Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System, Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères)**. IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, , R.R. 486, 1984 - 16 pages,

### 3.3.1.2.2 Algorytm wyznaczania kierunku poszukiwań wykorzystujący zmodyfikowaną metodę Newtona

Wyznaczanie dopuszczalnego kierunku poszukiwań w zmodyfikowanej metodzie jest sprowadzone do rozwiązania sytemu równań liniowych:

$$H \cdot q = -b \quad (18)$$

Gdzie  $H$  jest hesjanem zredukowanej funkcji celu a  $b$  wartością gradientu w punkcie  $y$  będącym aktualnym rozwiązaniem optymalnym. Problem (18) można sprowadzić do równoważnego problemu optymalizacji w postaci:

$$F(q) = \frac{1}{2} \cdot q^T \cdot H \cdot q + b^T \cdot q \rightarrow \min \quad (19)$$

Skuteczność przedstawionego podejścia zależy od specyficznych własności (19) a zastosowana metoda Fletcher-Reeves's pozwoliła osiągnąć bardzo dobre wyniki. **[Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System, Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères)**. IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, R.R. 486, 1984 - 16 pages]

### 3.3.1.2.3. Własności procedury wyznaczania minimum w kierunku

Kolejny etap wyznaczania minimum funkcji celu  $f(y)$  polega na poszukiwaniu minimum funkcji jednej zmiennej  $g(t)$  określonej przez poniższe równanie:

gdzie

$$g(t) = f(y(t)) \quad (20)$$

$$y(t) = y + tq_0 \quad (21)$$

Jest równaniem parametrycznym prostej w  $R^n$  przechodzącej przez  $y$  w kierunku:

$$q_0 = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$$

Można pokazać, że  $g(t)$  posiada dokładnie jeden pierwiastek  $t_0$ , który jest poszukiwanym minimum funkcji  $g(t)$  w kierunku  $q_0$  **[Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: Quelques proprietes asymptotiques de la solution d'un probleme de minimisation de gaspillages d'energie dans un reseau de distribution d'eau, Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères)**. IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, R.R. 489, 1984 - 14 pages].

Tak naszkicowany algorytm pozwala wyznaczyć punkt  $t_0$  z komputerową dokładnością. A jego użyteczność jest ściśle związana z małą złożonością obliczeniową. Złożoność obliczeniowa użytego algorytmu Fletchera-Reeves'a jest rzędu mn. To potwierdza celowość zastosowania procedury gradientowej wyznaczania minimum w kierunku.

### 3.3.1.3 Sterowanie operacyjne w sieciach dystrybucji wody

Agregacja modeli sieciowych była już stosowana przez wielu autorów [Mietek A. Brdys, B. Ulanicki, "Operational control of water systems: structures, algorithms, and applications", Prentice Hall 1994, University of Michigan, ISBN0136389740, 9780136389743, **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ułasiewicz Jędrzej: Optimization algorithms of operative control in water distribution systems, Journal of Computational and Applied Mathematics. 1997 vol. 84, s.81-99, Brdys, M.A. and Tatjewski, P. (2005) Iterative Algorithms for Multilayer. Optimizing Control. Imperial College Press/World Scientific]

W modelach sieci dystrybucji wody należy uwzględnić następujące uwarunkowania:

- Właściwe funkcjonowanie systemu zależy od realizacji pewnych relacji między ciśnieniami w węzłach sieci. Szczególnie ważną rzeczą jest tutaj możliwość napełniania i opróżniania zbiorników sieciowych.
- Stacje pomp są sterowane dyskretnie poprzez załączanie lub wyłączenie poszczególnych sekcji pomp. Wszystkie pompy pracują z maksymalną wydajnością.
- Koszt zużywanej energii elektrycznej przez stacje pomp w zadanym przedziale czasowym jest funkcją celu.

Jak już zaznaczono w p. 3.3.1.1. rozpatrywany problem jest na tyle złożony, że dla większych systemów jego rozwiązanie jest problematyczne [G. Cohen, Optimal control of water supply networks, in: S.G. Tzafestas (Ed.), Optimization of Dynamics Operational Research Models, North-Holland, Amsterdam, 1982, pp. 251-276, S. Miyaoka, M. Funubashi, Optimal control of water distribution systems by network flow theory, IEEE Trans. Automat. Control AC-29 (4) (1984) 303-311.6, U. Shamir, Optimization in water distribution systems engineering, Mathematical Programming Study, vol. 11, North-Holland, Amsterdam, 1979, pp. 65-84]. Trudności te zostały przewyżczone dzięki wykorzystaniu technik dekompozycji i agregacji najbardziej złożonych elementów systemu, np. sieci dystrybucji. Podejście proponowane tutaj różni się od podobnych [B. Coulbeck, M. Sterling, Optimized control of water distribution systems, Proc. IEEE, vol. 122, No. 2, 1978, F. Fallside and P.F. Perry, Hierarchical optimization of water supply network, Proc. IEE 122 (2) (1975), S. Miyaoka, M. Funubashi, Optimal control of water distribution systems by network flow theory, IEEE Trans. Automat. Control AC-29 (4) (1984) 303-311.6], ponieważ uwzględnione są wielkości ciśnień w sieci oraz dyskretny charakter pracy stacji pomp. Dzięki temu model systemu jest bardziej dokładny, choć powstają dodatkowe problemy obliczeniowe. Algorytm optymalizacji jest dwupoziomowy. Na poziomie wyższym rozwiązywany jest problem dynamiczny. Wyznaczona jest procedura eksploatacji zbiorników sieciowych. Wyznaczone wielkości przepływów do/z zbiorników są przekazywane do poziomu niższego. Rozwiązuje się tam problem statyczny. Rozwiązanie to liczba załączanych sekcji pomp w każdej stacji pomp oraz wielkości wypływów. Opisany teraz będzie algorytm rozwiązania problemu statycznego wykorzystującego metodę podziału i ograniczeń.

#### 3.3.1.3.1. Sformułowanie problem statycznego

Rozpatrywany system zawiera  $l$  stacji pomp,  $s$  zbiorników i  $n$  odbiorców. Wektor  $r$  jest określony jako:  $r = (-y, q, p)$ .

Problem optymalizacji dolnego poziomu polega na minimalizacji kosztów energii zużywanej przez stacje pomp przy zaspokajaniu potrzeb odbiorców:

$$F(q, p) = \min_{z, y} (\alpha \cdot z + b \cdot y) \quad (22)$$

Przy uwzględnieniu ograniczeń:

$$H_i(y_i, z_i) \geq v_i(r) \quad i = \overline{1, l} \quad (23)$$

$$h_i - k_i \cdot q_i^2 \geq v_i(r) \quad \text{if } q_i < 0 \quad i = \overline{1, s} \quad (24)$$

$$h_i + k_i \cdot q_i^2 \leq v_i(r) \quad \text{if } q_i \geq 0 \quad i = \overline{1, s} \quad (25)$$

$$\underline{y}_i \cdot z_i \leq y_i \leq \overline{y}_i \cdot z_i \quad i = \overline{1, l} \quad (26)$$

$$0 \leq z_i \leq \overline{z}_i \quad \text{and integer for } i = \overline{1, l} \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^l y_i = \sum_{i=1}^s q_i + \sum_{i=1}^n p_i = y_0 \quad (28)$$

Dla danego wektora  $r$  zostaje wyznaczona wartość  $v(r)$  poprzez rozwiązanie zbioru nieliniowych równań sieciowych (6)-(8). Jednakże procedura ta jest zazwyczaj czasochłonna, gdyż system może składać się z dużej liczby równań i zmiennych. W celu zmniejszenia skomplikowania problemu zastosowano metodę agregacji modelu sieci. Agregacja modelu sieci została wykorzystana przez J. Ułasiewicza w pracy doktorskiej<sup>1</sup>. Polega ona na aproksymacji relacji  $v(r)$  formami kwadratowymi:

$$v_i(r) = r^T \cdot A^i \cdot r + B^i \cdot r + C^i \quad (29)$$

Model w (29) jest liniowo zależny od parametrów  $A^i$ ,  $B^i$ ,  $C^i$ . Wszystkie jego elementy są określane przy pomocy metody najmniejszych kwadratów. W szczególności parametry  $A^i$ ,  $B^i$ ,  $C^i$  modelu zagregowanego mogą być wyznaczane w pasywnym eksperymencie identyfikacyjnym. W tym przypadku ciśnienia i przepływy muszą być mierzone na wyjściach stacji pomp. Wykorzystanie związku (29) w (22) - (28), generuje następujący problem optymalizacji:

$$F(q, p) = \min_{z, y} (\alpha \cdot z + b \cdot y) \quad (30)$$

Przy ograniczeniach:

$$y^T \cdot A^i(z) \cdot y + B^i(z) \cdot y + C^i \geq 0 \quad i = \overline{1, k} \quad (31)$$

$$\underline{y}_i \cdot z_i \leq y_i \leq \overline{y}_i \cdot z_i \quad i = \overline{1, l} \quad (32)$$

$$0 \leq z_i \leq \overline{z}_i \text{ and integer for } i = \overline{1, l} \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^l y_i = y_0 \quad (34)$$

Jest to liniowy problem programowania mieszanego.

### 3.3.1.2.2. Metoda rozwiązywania problemu optymalizacji statycznej system dystrybucji wody

Sformułowany zagregowany problem optymalizacji posiada liczbę zmiennych i ograniczeń proporcjonalną do liczby stacji pomp i zbiorników w systemie. Jest to znacznie mniejszy wymiar zadania aniżeli wyjściowego systemu. Algorytm wykorzystuje metodę podziału i ograniczeń. Ograniczenia generują zbiór rozwiązań dopuszczalnych, który może być niespójny i zawierać nie więcej niż  $\prod_{i=1}^l (1 + \overline{z}_i)$  podzbiorów. Nie można założyć, że formy kwadratowe (31) są ujemnie pół-określone. Funkcje nie muszą być wklęsłe. Te własności czynią rozwiązanie problemu (30) - (34) niebanalnym. Wiadomo, że nie ma efektywnej metody rozwiązania takiego problemu. Z konieczności rozwinięto algorytm specjalnie przeznaczony do rozwiązywania takich klas problemów. Analizując problem (30) - (34), można zauważyć, że przy ustalonych wartościach zmiennej całkowitoliczbowej  $z$ , otrzymuje się problem optymalizacji dla ciągłej zmiennej  $y$ .

Problem ten oznaczymy przez  $P(z)$ :

$$P(z) = \sum_{i=1}^l \alpha_i \cdot z_i + \min_y \left\{ \sum_{i=1}^l \beta_i \cdot y_i \right\} \quad (35)$$

Przy ograniczeniach:

$$y^T \cdot A^i(z) \cdot y + B^i(z) \cdot y + C^i \geq 0 \quad i = \overline{1, k} \quad (36)$$

$$\underline{y}_i \cdot z_i \leq y_i \leq \overline{y}_i \cdot z_i \quad i = \overline{1, l} \quad (37)$$

<sup>1</sup> Ułasiewicz Jędrzej: Minimalnoenergetyczne sterowanie przepływem w nieliniowej sieci z akumulacją metoda agregacji jej modelu, PhD dissertation, Jędrzej Ułasiewicz. Raporty Inst. Cybern. PWr. 1984 Ser. PRE nr 32, 130 s. rozprawa doktorska (22.11.1984) Politechnika Wroclawska, Instytut Cybernetyki Technicznej, Wroclaw 1984

$$\sum_{i=1}^l y_i = y_0 \quad (38)$$

Zastosowano metodę podziału i ograniczeń w dwóch etapach. Najpierw utworzono listę wszystkich problemów  $P(z)$  zawierających potencjalnie rozwiązanie optymalne. Następnie stosując testy dopuszczalności dokonano reSelekcji listy. Wykonane testy, m.in. na danych z rzeczywistego obiektu składającego się z trzech stacji pomp i dwóch zbiorników, potwierdziły efektywność zaproponowanej metody. Dzięki wykonanym testom odrzucono prawie 90% problemów  $P(z)$  bez konieczności rozwiązywania ich. Można zauważyć, że zgodnie z wyjściowymi założeniami,  $H_i(y_i, z_i)$  są formami kwadratowymi. Sformułowany wyżej problem jest nieliniowym problemem  $P(z)$  rozwiązywanym zmodyfikowaną metodą Kelley'a płaszczyzn odcinających opracowaną przez Nikodema i Ułasiewicza<sup>2</sup>. Celem modyfikacji było uwzględnienie możliwości niewypukłości zbioru rozwiązań dopuszczalnych.

Należy podkreślić, że omawiane tutaj problemy są całkowicie różne od znanych jako zagadnienie zapasów (inventory problems). Klasyczny model dotyczy izolowanego magazynu lub systemu magazynów. Natomiast w sieciach dystrybucji wody takie wyizolowanie zbiorników byłoby zbyt dużym uproszczeniem. Przeprowadzone testy potwierdziły celowość wykorzystania zagregowanego modelu sieci. Omawiany wyżej algorytm może być zastosowany w procedurze dolnego poziomu systemu wyznaczania optymalnego harmonogramu  $q(t)$  wypełniania zbiornika w sieci.

#### **3.3.1.4. Omówienie uzyskanych wyników związanych z „Aspektami optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów” na przykładzie systemów dystrybucji wody**

Autor rozwija narzędzia, metody teoretyczne i praktyczne do analizy i rozwiązywania realnych problemów z wielu zagadnień w dziedzinie modelowania, symulacji i optymalizacji procesów. Ze względu na dużą złożoność i wysoką wymiarowość badanych procesów stosowano techniki agregacji i dekompozycji. Kluczowe kwestie badane przez autora w latach 1981 – 2002 w omawianym punkcie „Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów” przedstawiono w ramach analizowania metod optymalizacji i symulacji systemów dystrybucji wody.

Mój wkład w rozwój badań problemów symulacji, sterowania i optymalizacji związany jest z wynikami uzyskanymi w latach (1981 - 2002) przy budowie hierarchicznych struktur sterowania systemów dystrybucji wody. Biorąc pod uwagę listę prac (p. 3. 3. 1), wymienione tam dwie pierwsze pozycje (Rapports de Recherche), powstały podczas mojego czteromiesięcznego pobytu jako Visiting Researcher w Institute Mathematique Applique de Grenoble, Université de Grenoble w 1984 roku. Jako członek Laboratorium TIM3, Equipe Algorithmique Mathematique, byłem zaangażowany w rozwój metody optymalizacji dla systemów dystrybucji wody (patrz Załącznik 6./ ATTESTATION DE STAGE).

W pierwszym raporcie „*An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System*” w proponowanej koncepcji systemu przyjęto, że głównym celem systemu sterowania było zaspokojenie potrzeb odbiorców. Po drugie postulowano minimalizację kosztów związanych z eksploatacją systemów dystrybucji wody. Analizowano niektóre problemy sterowania operacyjnego systemu dystrybucji wody, a głównym obszarem zainteresowania była analiza stanu ustalonego. Do tego celu zaproponowałem wielopoziomową strukturę systemu sterowania. Poddano analizie wyniki badań uzyskane przy opracowywaniu metod i algorytmów dla potrzeb systemu dystrybucji wody. Osiągnięte wyniki wykorzystują trójpoziomową strukturę systemu dystrybucji wody w aglomeracji miejskiej. Zgodnie z ogólną koncepcją systemu sterowania systemem [Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Ułasiewicz Jędrzej, *The algorithm for determining the optimal strategy for reservoirs interaction in water distribution system (in polish - Algorytm wyznaczania optymalnej strategii współdziałania zbiorników sieciowych z systemem wodociągowym)*, „Sterowanie systemem wodno-gospodarczym na obszarze aglomeracji miejsko-przemysłowej”, *Materiały na III konferencję, Ustroń-Jaszowiec, 17-19 maj 1983. Gliwice: PŚL., 1983. s. 27-36,*

<sup>2</sup> Nikodem Jan, Ułasiewicz Jędrzej: *Modyfikacja algorytmu Kelley'a dla zadań z niewypukłym zbiorem rozwiązań dopuszczalnych* / Jan Nikodem, Jędrzej Ułasiewicz. *Archiwum Automatyki i Telemekhaniki*. 1988, t. 33, z. 1, s. 105-115

(Zeszyty Naukowe - Politechnika Śląska. Automatyka, z. 69)]. Dzięki temu zaproponowano nowy algorytm rozwiązujący problem minimalizacji strat energii w sieciach dystrybucji wody p. (9) – (10):

$$f(y) = \sum_{i=1}^n f_i(y_i)$$

Przy ograniczeniach:

$$A(y) = p$$

Funkcja celu w (9) jest interpretowana jako moc tracona w rozpatrywanej sieci dystrybucji wody.

Drugi raport „Some asymptotic properties of the solution of a problem of minimization of energy wastes in water distribution” analizuje własności asymptotyczne Algorytmu do rozwiązania problemu minimalizacji strat energetycznych w sieci wodociągowej. Wspomniany Algorytm został dokładnie zbadany w przypadku, gdy zapotrzebowanie odbiorników zmienia się według wzoru:

$$y = \sigma_0 t; \quad \sigma_0 \in \mathbb{R}_+^r; \quad t \in [0, \infty].$$

Wektor  $y$  jest wektorem przepływów w sieci, a  $\sigma$  oznacza potrzeby odbiorców. Założono ponadto, że zależność między ciśnieniem w węzłach a zapotrzebowaniem odbiorców jest kwadratowa. W konsekwencji dało to zagregowany model systemu dystrybucji wody i stanowiło podstawę dalszych prac. W następnych dwóch referatach przedstawiane są wyniki moich badań metod i algorytmów sterowania operacyjnego i dynamicznego systemami dystrybucji wody. Prace zostały opublikowane w *Journal of Computational and Applied Mathematics: Some models for water distribution systems i Optimization algorithms of operative control in water distribution systems*. Wykorzystano wyniki badań omawianych powyżej w Rapports de Recherche.

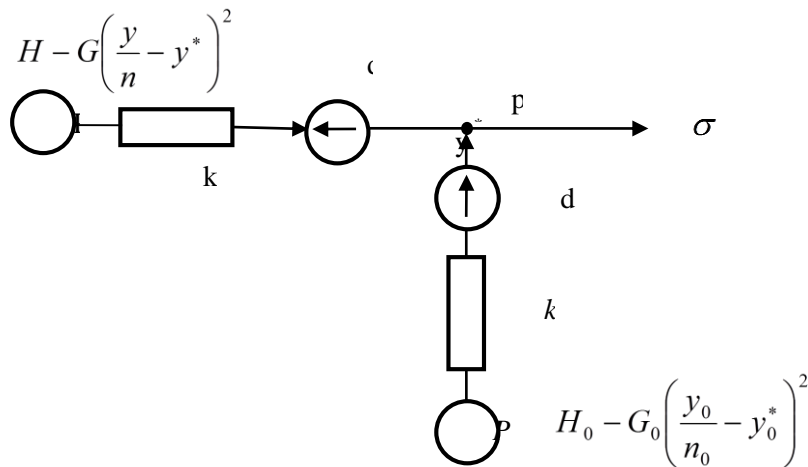
W pierwszym artykule „Some models for water distribution systems” badania były związane z systemem dystrybucji składającym się z typowych elementów: stacji pomp, rur, odbiorców, zaworów i zbiorników. Ostateczny model problemu optymalizacji zawierający wszystkie niezbędne ograniczenia jest tak skomplikowany, że nie da się go analizować bez pomocy pewnych specjalnych technik. W omawianej pracy zaproponowano wielopoziomowe podejście oparte na idei agregacji sieci rurociągów. Badana jest przydatność tej metody w optymalizacji systemów zaopatrzenia w wodę. Na podstawie zagregowanego modelu sieci określone są optymalne strategie sterowania stacjami pomp. System optymalizacji składa się z liniowej funkcji celu i kwadratowej i zbioru nieliniowych ograniczeń (formy kwadratowe). Jest to problem nieliniowego programowania mieszanego, który jest rozwiązany przy pomocy zmodyfikowanej metody podziału i ograniczeń.

W drugiej pracy „Optimization algorithms of operative control in water distribution systems” prezentowany jest wielopoziomowy algorytm wyznaczania sterowania optymalnego w statycznym systemie dystrybucji wody wykorzystujący technikę agregacji. Przedstawiane są zarówno model matematyczny tego systemu jak również dwa podstawowe algorytmy. Pierwszym z nich jest algorytm symulacji sieci rurociągów, a drugim jest algorytm wyznaczania sterowania optymalnego stacji pomp. W artykule analizowano również problem statyczny [F.J. Kotowski M. Olesiak, *optymalizacja odpadów energetycznych w wodnych systemach dostaw kompleks, Proc. sixth IFAC / IFIP Intemat. Konf. od Aplikacje Cyfrowy komputerowe do procesu sterowania, Dusseldorf, 1980, s. 386-395*] minimalizacji energii elektrycznej w sieci wodociągowej. Przedstawiono także algorytm rozwiązywania tego problemu. Na koniec podano algorytm sterowania operacyjnego systemu dystrybucji wody. W celu weryfikacji opracowanych algorytmów sterowania operacyjnego, przeprowadzono serię 40 testów. Ponadto przeprowadzono serie testów dla systemu zawierającego trzy stacje pomp i dwa zbiorniki.

W pracy wymienionej w publikacjach w p. 3.3.1: „Determination of feasible set of solutions for mixed integer nonlinear optimization problem” jest analizowany Nieliniowy Problem Programowania Mieszanego (Mixed Integer Nonlinear Problems - MINLP). Jest to problem optymalizacji nieliniowej, gdzie są obecne dwa typy zmiennych: zmienne całkowite i ciągłe. Obecność zmiennych całkowitych rozszerza zasadniczo obszar zastosowań MINLP. Występuje tu liniowa funkcja celu w obecności ograniczeń liniowych i nieliniowych (formy kwadratowe). Omawiany jest przypadek dwuwymiarowy zmiennych całkowitych i ciągłych. Głównym punktem ciężkości jest budowa zbioru dopuszczalnego zmiennych. System dystrybucji sieci wodnej wydaje się być bardzo dobrą ilustracją do prezentowanego algorytmu. System (p. Rys. 1) składa się z dwóch stacji pomp (P i Po) o znanej maksymalnej liczbie identycznych jednostek pompowych. Zagregowana sieć składa się z dwóch łuków o znanych



parametrach: oporności rurociągu, różnicy wysokości, przepływu wyjściowego pompy, charakterystyki i liczby pomp ( $k, k_0; d, d_0; y, y_0; H, H_0; G, G_0; n, n_0$ ) i znanej wielkości zapotrzebowań odbiorców ( $\sigma$ ). Funkcja celu w takim układzie określa koszt energii elektrycznej zużytej przez zespoły pomp, przy spełnionych wymaganiach odbiorców.

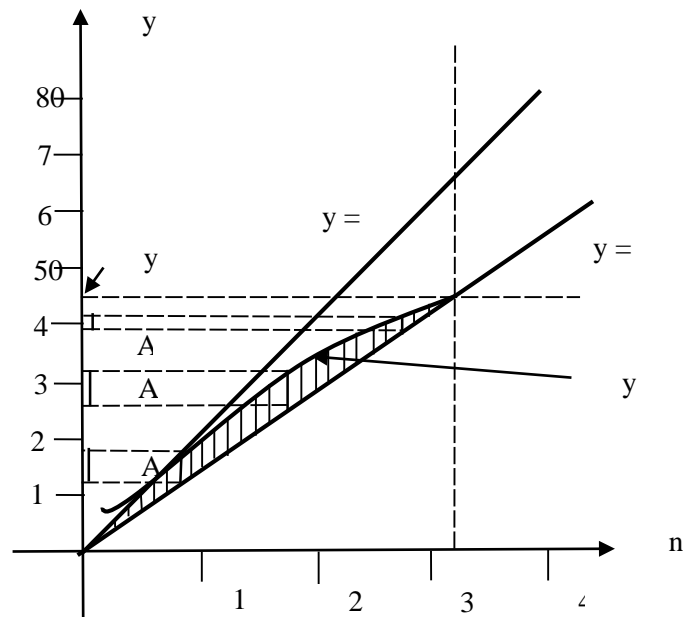


Rys. 1 Zagregowany system dystrybucji wody.

Poniższy wzór

$$f(n, n_0; y, y_0) = \dots$$

określa wielkość zużywanej energii elektrycznej niezbędnej do wytworzenia przepływu w sieci  $y$  (wielkości  $\alpha, \alpha_0, \beta, \beta_0$  są skalarami).



Rys. 2: Zbiór dopuszczalny dla zmiennych  $y = y(n)$ .

Zbiory dopuszczalnych przepływów  $y$ , zgodnie z Rys. 2, oznaczone są jako:  $A_1, A_2, A_3$ . Optymalne strategie dla wszystkich dopuszczalnych wielkości zapotrzebowania  $\sigma$  pokazano na Rys. 3. Zagregowane modele sieci dystrybucji wody opisywane były przez wielu autorów: [Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Szlachcic Ewa, Ułasiewicz Jędrzej, Badania symulacyjne i analityczne algorytmów optymalnego sterowania siecią wodociagowa w eksperymentalnym systemie wodno-gospodarczym, Raporty Inst. Cybern. PWr 1983 Ser. SPR nr 10, 113 s., (in polish), Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ułasiewicz Jędrzej, Optimization algorithms of operative control in water distribution

systems. *J. Comput. Appl. Math.* vol. 84 s. 81-99, 1997, Miyaoka S. and Funabashi M. (1984) *Optimal Control of Water Distribution Systems by Network Flow Theory*, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-29, No.4 pp.301-303]. Każdy odcinek na Rys. 3 określa zależność między wielkością zapotrzebowania odbiorców  $\sigma = y + y_0$ , a minimalną wielkością energii potrzebną na realizację tego żądania. Liczby naturalne nad tymi odcinkami oznaczają liczbę sekcji pomp, które powinny być załączone w odpowiedniej pompowni, aby zrealizowane zostało wymaganie  $\sigma$  odbiorców. Funkcją celu w analizowanym systemie jest koszt energii elektrycznej zużywany przez stacje pomp. Rozwiązanie wyznacza odpowiednią liczbę pomp załączanych na stacjach pomp oraz ich wymaganą wydajność.

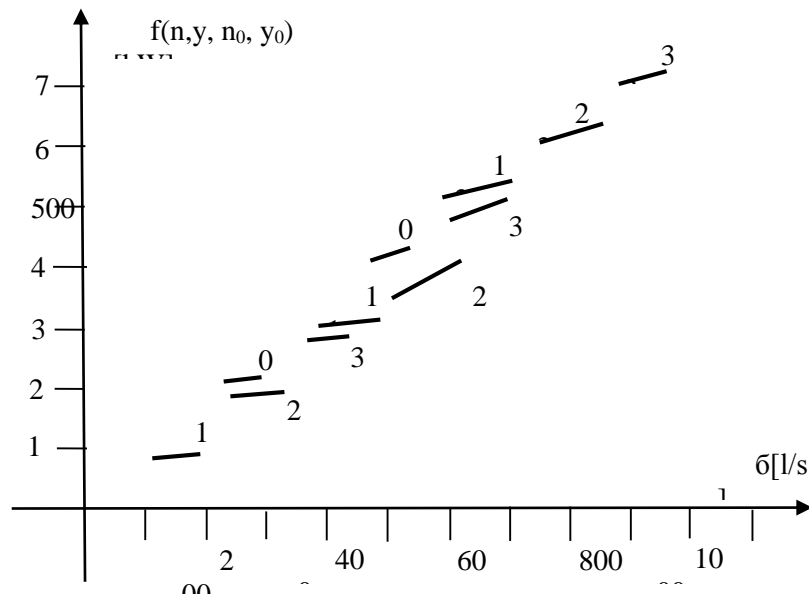


Figure 3: The relationship between goal function and receivers demands.

Łatwo zauważyć, że zbiór dopuszczalnych rozwiązań nie jest spójny. Na osi  $\sigma$  zapotrzebowań odbiorców są dziury (gaps). Oznacza to, że dla niektórych wartości  $\sigma$  rozwiązanie optymalne może nie istnieć.

Jak już to było uprzednio podkreślane, głównym celem systemu dystrybucji wody jest spełnienie zapotrzebowania odbiorców. Aby to osiągnąć konieczne jest dostarczenie odpowiedniej ilości wody (określonej jakości, w określonych odstępach czasu). Sieć składa się z rurociągów łączących źródła (np. stacje pomp) z konsumentami. Wielopoziomowe struktury sterowania zostały omówiona w licznych pracach [Brdys, M.A. and Tatjewski, P., *Iterative Algorithms for Multilayer. Optimizing Control*. Imperial College Press/World, B, 2005, Coulbeck, M. Sterling, *Optimized control of water distribution systems*, *Proc. IEEE*, vol. 122, No. 2, 1978; R. Klempous, J. Kotowski, J. Nikodem, *System approach to the water distribution problems*, *Proc. 12th European Meeting on Cybernetics and Systems Research*, Vienna, Austria, 1994, pp. 957-963; R. Klempous, J. Kotowski, J. Nikodem, *Supervisory control and data acquisition system for the water distribution networks*, *Proc. IASTED Intemat. Conf.*, Gold Coast, Australia, 1996, pp. 32-34]. Najczęściej stosowanym kryterium minimalizacji kosztów jest minimalizacja zużycia energii elektrycznej systemu dystrybucji, ponieważ jego obsługa i konserwacja mogą być zaliczone do kosztów kapitałowych. Proponowany model systemu sterowania zakłada trójpoziomową strukturę [G. Cohen, *Optimal control of water supply networks*, in: S.G. Tzafestas (Ed.), *Optimization of Dynamics Operational Research Models*, North-Holland, Amsterdam, 1982, pp. 251-276, B. Coulbeck, M. Sterling, *Optimized control of water distribution systems*, *Proc. IEEE*, vol. 122, No. 2, 1978, Z. Mahjoub, *Contribution d'etude l'optimization des reseaux mailles*, *These d'Etat-Informatique-Mecanique des Fluides*, Institute Nationale de Toulouse'76, 1983], że w badanym modelu systemu dystrybucji wody, minimalizacja kosztów jest podstawowym kryterium optymalizacji. Zgodnie z [J. Nikodem, J. Utasiewicz, *Generalization of the Kelley's algorithm to problems with nonconvex set of feasible solutions*, *Archiwum Automatyki i Telemekhaniki* 33 (I) (1988) 105-115 (in Polish), A.A. Piervozvanski, *Mathematical Models in Production Processes*, Izdatielstwo Nauka, Moscow, 1975 (in Russian), Mietek A. Brdys, B. Ulanicki, "Operational control of water systems: structures, algorithms, and applications", Prentice Hall 1994, University of Michigan, ISBN0136389740, 9780136389743, R. Klempous, J. Kotowski, J. Nikodem, *System*

*approach to the water distribution problems, Proc. 12th European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Vienna, Austria, 1994, pp. 957-963, H.M. Salkin, Integer Programming, Addison-Wesley, Reading, MA, 1975].*

W referacie plenarnym "*Simulation, control and optimization problems in distribution networks - our survey results*" przedstawionym na I IFAC International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems, TiASWiK '02, Gdańsk 2002; podsumowałem swój dorobek oraz dorobek zespołu pracującego nad tymi zagadnieniami od 1980 roku. Oprócz omówienia problemu modelowania, sterowania, optymalizacji i symulacji systemów dystrybucji wody, dołączono również część związaną z systemem IT. Zaproponowano wielopoziomowy system IT wspomagania sterowania oraz system akwizycji danych. Omówiono trójpoziomowy algorytm znajdowania sterowania optymalnego w statycznym systemie dystrybucji oparty na idei techniki agregacji. Przedstawiono, na podstawie wyników wspomnianych wcześniejszych prac, model matematyczny tego systemu wraz z jego elementami, jak również dwa podstawowe algorytmy. Pierwszym z nich jest algorytm symulacji rozptyłu w sieci dystrybucji, a drugim algorytm wyznaczania sterowania optymalnego dla zespołów pompowych. W referacie omówiono statyczny problem minimalizacji strat energetycznych w sieci, a także opis algorytmu rozwiązywania tego problemu.

Pierwszy poziom to poziom sterowania bezpośredniego sekcjami pomp, zasuwami, ciśnieniem i przepływem w sieci. Na tym poziomie, na podstawie algorytmu sterowania, wyznaczana jest rzeczywista liczba pracujących sekcji pomp, jak i pożądane wielkości zasuw. Natomiast wartości zalecanych ciśnień i przepływów z pompowni są odbierane (jako parametry algorytmu sterowania) z drugiego (górnego) poziomu. Poziom ten określa powyższe parametry, które zapewniają zaspokojenie popytu odbiorców. Rzeczywiste wartości tych parametrów uzyskuje się z minimalizacji kosztów energii elektrycznej. W rezultacie uzyskuje się harmonogramy graficzne ilustrujące współpracę stacji pomp i zbiorników. Na najwyższym, trzecim poziomie określa się optymalny harmonogram napełniania zbiorników (graficzny). Wykorzystywany jest prognozowany histogram poboru wody, potrzeby konsumentów jak i parametry zagregowanego systemu dystrybucji wody. Algorytm zapewnia spełnienie wymagań konsumentów i zmniejszenie kosztów energii, przy uwzględnieniu zmieniających się dobowo cen energii elektrycznej. Uzyskane wyniki są związane z drugim poziomem systemu sterowania. Celem tego poziomu jest utrzymanie systemu dystrybucji wody w optymalnym reżymie działania, zakładając, że zostaną spełnione żądania konsumentów. Analizowane problemy optymalizacji obejmują wartości przepływu w sieci, wielkości ciśnień w węzłach, pozycje zaworów i liczby sekcji pomp załączanych w każdym momencie w badanym okresie czasu. Prowadzi to do nieliniowego zagadnienia dużego wymiaru, który jest praktycznie nie do rozwiązania. Dlatego też, korzystając z wyników w omówionych wcześniej pracach, wykorzystano techniki oparte na metodach agregacji i dekompozycji, umożliwiającymi dokonanie niektórych niezbędnych uproszczeń modelu matematycznego [J. Ulasiewicz, *Minimal energy control in nonlinear distribution systems by network model aggregation method, PhD dissertation, Report of Institute of Technical Cybernetics, Wrocław, Poland, 1984 (in Polish)*] w celu optymalizacji algorytmu trójpoziomowego. Numeryczna weryfikacja skuteczności opracowanych algorytmów sterowania operacyjnego polegała na przeprowadzeniu serii kilkudziesięciu testów. Ponadto, przeprowadzone zostały również eksperymenty symulacyjne dla sieci dystrybucji wody składające się z trzech stacji pomp, dwóch zbiorników, 24 dwóch węzłów i 26 łuków, gdzie wykorzystano dane oryginalnej sieci dystrybucji wody miasta Przemyśla.

### **3.3.2. Ważniejsze cele i wyniki badań w zakresie „Aspektów modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych”.**

Następną grupą problemów ilustrujących inny aspekt badań w ramach „Wieloaspektowego podejścia do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” pokażę na przykładzie analizy systemu modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych w instalacji ACUREX. Zdobyte doświadczenie związane z realizacją omówionego już tematu „*Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów*” w p 3.3.1, a w szczególności wyniki uzyskane w dziedzinie modelowania, optymalizacji i symulacji procesów związane były z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji. Doświadczenie to było bardzo przydatne przy realizacji projektów w rozproszonych systemach instalacji solarnych ACUREX.

Mój dorobek w zakresie tej tematyki obejmuje 9 pozycji(( p. 3. 2. 3. B) lub Zał.4.2.) powstałych w latach 2001- 2009. Są to trzy prace z LF, jedna praca z LM, dwa rozdziały w książkach z WKiŁ oraz trzy referaty konferencyjne.

Publikacje te są efektem mojej współpracy z Universidad de Almeria i laboratorium Plataforma Solar de Almeria (<http://www.psa.es/webesp/index.php>), Hiszpania.

Uzyskane wyniki są również rezultatem mojego udziału w realizacji następujących grantów:

- **1998 – 2002:** Tools to model and control of a distributed solar collector field, Plataforma Solar de Almeria, Hiszpania (UE Improving Human Potential - IHP)
- **2004 – 2005:** Data Driven Analysis of Performance of Solar Plant Controllers under Disturbance Conditions (Bilateral project between University of Almeria, Spain and Wrocław University of Technology).

Niezależnie od tego, od 2002 roku laboratoria w Almerii umożliwiały semestralne lub dwusemestralne pobyty wielu moim studentom/dyplomantom w ramach programu Sokrates/Erasmus.

Zgodnie z p. 3. 2. 3. /B (LISTA PUBLIKACJI „ASPEKTY MODELOWANIA, OPTYMALIZACJI, STEROWANIA I SYMULACJI W ROZPROSZONYCH SYSTEMACH SOLARNYCH NA PRZYKŁADZIE INSTALACJI ACUREX” wyodrębniłem cztery (4) pozycje (p. Zał. 4.2), jako zawierające najbardziej istotne osiągnięcia w rozpatrywanym obszarze.

W nawiasie podano procentowy wkład habilitanta.

Są to następujące prace:

1. Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard [25%]**: Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717, 12 rys., 1 tab., bibliogr. [14] poz. Lokalizacja elektroniczna(EJOR): <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056> ;
2. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard [25%]**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 621-626, bibliogr. 13 poz. [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83);
3. Berenguel Manuel, Cirre Cristina M, **Klempous Ryszard [25%]**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: Hierarchical control of a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 614-620, 3 rys., bibliogr. 9 poz. [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_82](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_82).
4. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard [25%]**, Nikodem Michał Berenguel Manuel: Diagnostyka procesu sterowania instalacją pozyskiwania energii słonecznej. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*. 2005, wyd. spec. 9, bis, s. 213-216).

Kopie tych pozycji literaturowych zamieściłem w Zał. 4.2.

Na konferencji EURO XXI 2006, Reykjavik, spośród 1800 wygłoszonych referatów, na organizowanej przeze mnie Invited Session: Hierarchical models applications (<http://www.euro2006.org/EuroFinalProgramme.pdf>), został wyselekcjonowany referat: “Reference Governor Optimization and Control of a Distributed Solar Collector Field” autorów :Cristina Rogelia Martinez Cirre, Loreto Valenzuela, **Ryszard Klempous**, Manuel Berenguel. Autorów zaproszono do przygotowania artykułu, jako jednego z dwunastu wybranych, do *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>”. Jest to też efekt mojej wieloletniej współpracy z Universidad de Almeria i Plataforma Soalr de Almeria.

### 3.3.2.1. Opis instalacji ACUREX w Plataforma Solar de Almería

Plataforma Solar de Almería (PSA - <http://www.psa.es/webesp/index.php>), w Andaluzji, południowa Hiszpania, jest centrum badań R&D systemów technologii solarnych, ich sterowania, efektywności, wydajności. W obszarze sterowania automatycznego instalacjami solarnymi placówka ta odgrywa ważną rolę. Nie prowadzi się tam prac w zakresie systemów fotowoltaicznych.

Systemy te koncentrują się na metodach ogniskowania energii słonecznej i ogrzewaniu medium przenoszącego ciepło (Heat Transfer Fluid - HTF). Następnie w procesie wymiany ciepła wytwarza się para wodna zasilająca generatory (turbiny) energii elektrycznej.

W czasie ponad 25- letniej działalności PSA uzyskano ogromne doświadczenie zarówno w zakresie badań nad tymi problemami jak i w zakresie eksploatacji obiektów. Zdobyta wiedza oraz przeprowadzane w ciągu tego czasu eksperymenty pozwoliły na rozwinięcie metod i narzędzi w zakresie skutecznej automatyzacji pracy obiektów (w szczególności stabilizacji temperatury medium HTF). W pierwszej dekadzie XXI wieku miałem możliwość uczestniczenia w pracach w laboratorium rozproszonych kolektorów solarnych PSA ACUREX (Rys.1).

Instalacja ACUREX to system 480 parabolicznych solarnych kolektorów rynnowych ACUREX 3001 rozmieszczonych w 10 równoległych rzędach (Rys.1). W roku 2013 rozpoczęto modernizację tej instalacji. Głównym celem instalacji było pozyskiwania energii słonecznej wykorzystując paraboliczne, zwierciadlane kolektory rynnowe. Umożliwiło to przetwarzanie energii promieniowania słonecznego na energię cieplną (Rys.1). Sumaryczna powierzchnia lusterek wynosiła ok. 0,25ha. Przechodząca przez ogniskową zwierciadeł oś obrotu jest nieruchoma w stosunku do całej instalacji kolektorów (położona jest w kierunku wschód-zachód). System kolektorów śledzi położenie słońca nad horyzontem dzięki poruszającym je siłownikom. Promienie słoneczne skupiane są na przebiegających wzdłuż ogniskowej rurach z ogrzewanym medium. Energia słoneczna zamieniana jest na energię cieplną w procesie ogrzewania medium (olej). Olej jest dostarczany do zbiornika, o objętości zapewniającej ciągłość obiegu oleju w instalacji. Zbiornik ten jest układem magazynującym energię cieplną. Z uwagi na stosowany olej syntetyczny, którego gęstość ulega dużym zmianom wraz z temperaturą, ciepły i zimny olej mogą być przechowywane na różnych poziomach w tym samym zbiorniku. Temperatura dochodzi do 300°C. W wyniku stratyfikacji oleju, cieplejszy zawsze pozostaje na poziomie wyższym niż chłodny, ponieważ jego gęstość jest znacznie niższa niż oleju zimnego

Podstawowym elementem sterowania decydującym o efektywności każdego układu pozyskiwania energii słonecznej jest system sterowania nadążnego za ruchem słońca.

Powszechnie stosowanym sposobem ogniskowania promieni słonecznych w wymaganym punkcie jest sterowanie nadążne o dwóch stopniach swobody [Smolec W.; Fototermiczna konwersja energii słonecznej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000].



Rys. 1<sup>3</sup>. (Fig. 1. The ACUREX solar field and the thermal storage tank.(p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...)

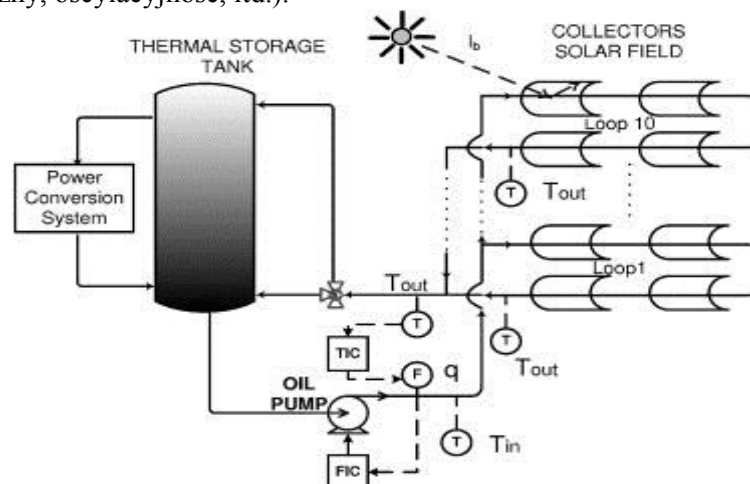
Paraboliczne lustra rynnowe (Rys.2), rozmieszczone na osi wschód-zachód, w instalacji ACUREX umożliwiły zastosowanie systemu nadążnego o jednym stopniu swobody (pionowym). System

<sup>3\*</sup> W rozdziale tym rysunki i tabele opisywane są według reguły: najpierw kolejny numer rysunku, dalej numer rysunku i jego opis z omawianej pracy zgodnie z listą prac (1 do 4) w p. 3.2.3 /B 2. *Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, Klemous Ryszard: Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. European Journal of Operational Research. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717, 12 rys., 1 tab., bibliogr. [14] poz. Lokalizacja elektroniczna(EJOR): <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>.W nawiasie podany jest skrót tytułu tej pracy.*

sterowania nadążnego kolektorami za ruchem słońca zainstalowany w PSA zapewnia dobre ogniskowanie promieni w oparciu o wskazania czujnika promieniowania bezpośredniego (piranometru) sprzężonego ze zwierciadłami parabolicznymi. Czujnik ten jest jednak czuły na zakłócenia atmosferyczne, co często powoduje niestabilność systemu nadążnego. Efektywność pozyskiwania energii słonecznej, w przypadku zwierciadlanych kolektorów rynnowych, zależy od właściwego pozycjonowania względem słońca urządzeń skupiających promieniowanie bezpośrednie oraz utrzymania optymalnej temperatury medium transportującej ciepło. Najistotniejszym parametrem w procesie sterowania przepływem i temperaturą oleju jest wartość promieniowania słonecznego. Jest ona bardzo uzależniona od warunków atmosferycznych. Stanowi duże utrudnienia dla systemu sterowania [Johansen T., Storaas C.; *An internal controller for distributed solar collector fields, IHP Programme, Proceedings of the 2-nd Users Worksho; Almería, Spain, 2002; Pereira C., Dourado A.; Application of a neuro-fuzzy network with support vector learning to a solar power plant, IHP Program, Proceedings of the 2nd Users Workshop, Almería, Spain, 2002; Silva R., Rato M., Lemos J.: Observer based time wrapped control of distributed collector solar fields, IHP Program, Proceedings of the 2nd Users Workshop, Almería, Spain, 2002; Zarza E. et al.. The DISS Project: Direct Steam Generation in Parabolic Trough Systems. Operation and Maintenance Experience and Update on Project Status. Journal of Solar Energy Engineering – Transactions of the ASME, Vol. 124, Issue 2, pp. 126-133, May 2002].*

Najważniejsze cele systemu sterującego przepływem oleju w instalacji ACUREX są określone następująco ( Dorf R., Bishop R.: *A modern control systems*, Addison-Wesley Longman Inc., Menlo Park CA 1998.):

- Stabilizacja temperatury oleju instalacji kolektorów na poziomie określonym przez wymogi technologiczne,
- ograniczenie wpływu zakłóceń (głównie atmosferycznych) na zmiany punktu pracy regulowanego obiektu,
- redukcja wpływu zmian parametrów regulowanego obiektu na przebieg procesu regulacji (niestacjonarności procesu obiektu),
- polepszenie dynamicznych własności systemu regulacji (czas regulacji, maksymalny uchyb dynamiczny, oscylacyjność, itd.).



Rys. 2. (Fig. 2. Schematic diagram of the ACUREX solar field (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...))

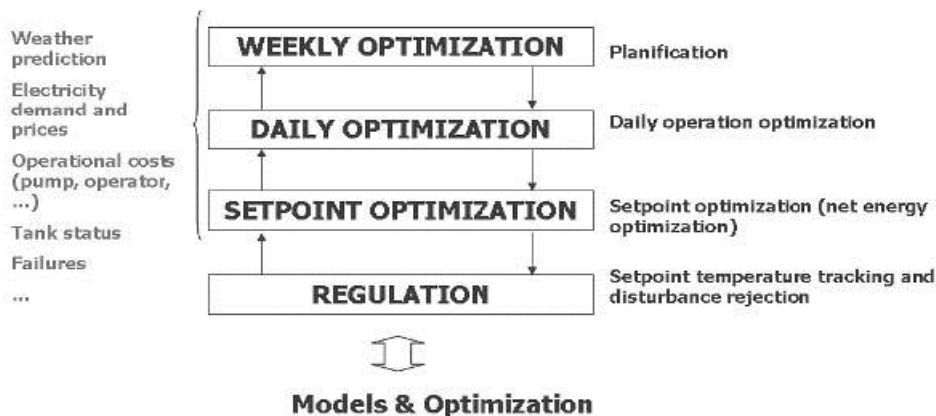
Moje wieloletnie prace związane z realizacją omówionego już tematu „Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów” zostało wykorzystane w trakcie prac prowadzonych w PSA Dzięki temu uzyskane doświadczenie umożliwiło mi współuczestnictwo w pracach związanych z modelowaniem, optymalizacją, sterowaniem i symulacją w rozproszonych systemach solarnych..

Analizowane były dynamiczne modele instalacji kolektorów ACUREX oraz różne metody i schematy układów sterowania, proponowane i testowane w PSA.

### 3.3.2.2. Własności hierarchicznej struktury sterowania w instalacji ACUREX

Mój wkład w realizację „ASPEKTÓW MODELOWANIA, OPTYMALIZACJI, STEROWANIA i SYMULACJI w ROZPROSZONYCH SYSTEMACH SOLARNYCH” na przykładzie instalacji ACUREX polegał głównie na:

- I Określeniu hierarchicznej czterowarstwowej struktury sterowania [p. 3. Berenguel Manuel, Cirre Cristina M, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: *Hierarchical control of a distributed solar collector field. Lecture Notes in Computer Science. 2005, vol. 3643, s. 614-620, [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_82](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_82)*]. Warstwy te, to warstwa sterowania, warstwa optymalizacji wartości zadanej, warstwa dobowego sterowania operacyjnego oraz warstwa planowania produkcji w tygodniowym horyzoncie czasowym (Rys.3). Te cztery warstwy operują w różnych horyzontach czasowych, w których stosowane są różne modele do celów optymalizacji. W oparciu o model PDE pola kolektora słonecznego proponowano modele uproszczone. Wykorzystano wersję statyczną do rozwiązywania dobowych problemów sterowania operacyjnego i planowania produkcji. Zasugerowano funkcje celu jako funkcję kosztów i optymalizator używany do uzyskania wartości zadanych w różnych horyzontach czasowych.
- II Analizie fizycznego modelu optymalizacji wykorzystującego strukturę hierarchiczną [p 1. Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**: *Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field, European Journal of Operational Research. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>*] Struktura ta zapewnia optymalizację zadanej temperatury w najniższej warstwie systemu sterowania. Wykorzystuje dekompozycję problemu sterowania w różnych horyzontach czasowych. Proponowany problem optymalizacji w oparciu o model stanu ustalonego temperatury pola kolektora słonecznego, maksymalizuje zysk (różnicę pomiędzy kosztami wytwarzania energii elektrycznej i kosztami jej produkcji) w nieliniowym procesie optymalizacji z uwzględnieniem ograniczeń (zmian temperatury i przepływu medium - sygnału sterującego).
- III Opracowaniu metod i narzędzi eksploracji danych z systemów monitorowania instalacji słonecznych w celu wspomaganie budowy i weryfikacji modeli instalacji w zmiennych warunkach środowiskowych. Umożliwia to wykrywanie stanów awaryjnych oraz opracowanie metod modelowania zmienności warunków zewnętrznych na podstawie danych historycznych [p 2. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: *Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. Lecture Notes in Computer Science. 2005, vol. 3643, s. 621-626, [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83)*]. W oparciu o wcześniejsze doświadczenia uzyskane w PSA, określiłem zbiór zmiennych istotnych dla analizy wielowymiarowej i dla awarii instalacji; parametrów dynamicznych projektowania modelowania i sterowania, projektowania sterownika (głównie fuzzy logic), wpływu zmiennych środowiskowych na stan systemu, wykrywania niedopasowania instalacji/modelu. Ponadto, przyczyniłem się do określenia funkcji optymalizacji stosowanej przy agregacji zmiennych definiujących główne składniki analizy i innych technik związanych z przetwarzaniem analitycznym. Sterowanie omawianym obiektem polega na utrzymywaniu żądanego przepływu medium (oleju). Przepływ natomiast powiązany jest z temperaturą zależnościami nieliniowymi opisanymi równaniami różniczkowymi o stałych rozłożonych, w których zawarte są powiązania pomiędzy takimi zmiennymi jak promieniowanie bezpośrednie, temperatura wejściowa oleju, temperatura otoczenia czy prędkość wiatru.



Rys.3. (Fig. 2. Hierarchical control architecture. (p. 3.3.2. praca 3 Hierarchical Control of...))

Zgodnie z regułami teorii systemów sterowania, w takich sytuacjach zaleca się zastosowanie układu ze sprzężeniem do przodu (feedforward). Układy te bazują na bieżących pomiarach zakłóceń oddziałujących na: natężenie promieniowania bezpośredniego, temperaturę oleju na wejściu i temperaturę otoczenia, a następnie kompensacji wpływu tych zakłóceń na przebieg procesu sterowania.

Wpływ zmienności natężenia promieniowania bezpośredniego w połączeniu z nieliniowością obiektu powoduje, że układ regulacji pracuje poprawnie tylko w pobliżu określonego punktu pracy, dla którego dobierane są parametry regulatora. Należy, więc zaproponować taką strukturę w układzie regulacji, która pozwoli utrzymać system zawsze w otoczeniu tego samego punktu pracy. Niezbędny jest model instalacji ACUREX opisujący właściwości statyczne i dynamiczne obiektu.

### 3.3.2.3 Modelowanie i symulacja pracy kolektorów parabolicznych ACUREX

Na podstawie modelu matematycznego instalacji o stałych skupionych, zaproponowano model symulacyjny obiektu oraz model odwrotny, pomocny w procesie sterowania. Zbudowano model symulacyjny sterowania za pomocą regulatora PID oraz sprzężenia zwrotnego do przodu (feedforward).

Korzyści, jakie można osiągnąć dzięki wykorzystaniu w procesie sterowania modelu obiektu, były już szeroko omawiane [Camacho E.F., Berenguel M., Rubio, F.R. *Advanced control of solar plants, Series: Advances in Industrial Control, Springer-Verlag, London 1997*; Carmona R.; *Analisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento en un eje, PhD thesis, Universidad de Sevilla 1985*; Valenzuela L., Balsa P.: *A series and parallel feedforward control schemes to regulate the operation of a solar collector field, Serie Ponencias, Proceedings of the 1st Users Workshop, Almería, Spain, 199*]. Również wyniki opublikowanych prac eksperymentalnych, realizowanych w PSA, testujących wiele różnorodnych systemów sterowania kolektorami ACUREX, wskazują na wykorzystywanie modelu obiektu, jako narzędzia umożliwiającego dobór właściwych kryteriów regulacji [Camacho E.F., Berenguel M., Rubio, F.R. *Advanced control of solar plants, Series: Advances in Industrial Control, Springer-Verlag, London 1997*; Vaz F., Oliviera R., Neves de Silva R.: *PID control of a solar plant with gain interpolation. Serie Ponencias, Proceedings of the 1st Users Workshop, Almería, Spain, 199*]. Bardzo dobrym modelem, uwzględniającym przestrzenny rozkład własności obiektu regulacji, jest model o parametrach rozproszonych [Camacho E.F., Berenguel M., Rubio, F.R. *Advanced control of solar plants, Series: Advances in Industrial Control, Springer-Verlag, London 1997*].

Przedstawiony poniżej model prostszy [Camacho E.F., Rubio F.R., Hughes M.. *Self-tuning control of a solar power plant with a distributed collector field. IEEE Control Systems Magazine, pp. 72-78, 1992*], jest modelem o parametrach skupionych, jednakże wystarczającym, aby pokazać korzyści, jakie możemy osiągnąć uwzględniając model w procesie regulacji.

Bilans energetyczny kolektorów ACUREX opisuje następujące równanie, (przedstawiono zostało we wzmiankowanej już wyżej pracy):

$$C \frac{dT}{dt} = n_0 SI - qPc_p(T - T_{in}) - H_l(T_m - T_a) \quad (*)$$

gdzie

T - temperatura wyjściowa,

I - bezpośrednie promieniowanie słoneczne,

T<sub>in</sub> - temperatura wejściowa oleju,



$T_m$  - średnia temperatura oleju pomiędzy wejściem i wyjściem,  
 $T_a$  - temperatura otoczenia,  
 $q$  - przepływ,  
 $n_0$  - sprawność zwierciadeł,  
 $S$  - efektywna powierzchnia zwierciadeł,  
 $C$  - pojemność cieplna oleju,  
 $Pc_p^4$  - współczynnik efektywności magazynowania energii w zbiorniku  
 $H_l$  - współczynnik strat w instalacji.

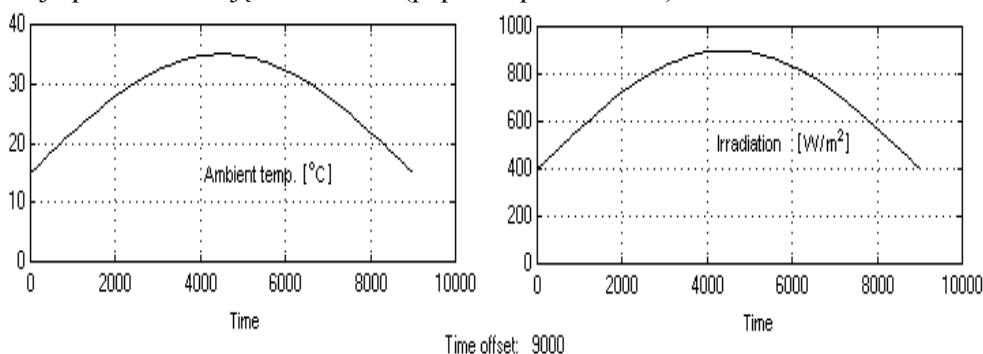
*Zależność (1) określa, że energia ( $n_0SI$ ) dostarczana do instalacji przez promieniowanie słoneczne w jednostce czasu, powoduje podgrzanie oleju ( $C dT/dt$ ), a w rezultacie jego przepływu, przekazanie do zbiornika energii  $qPc_p(T-T_{in})$ , przy stratach  $H_l(T_m-T_a)$  ponoszonych w instalacji, związanych z realizacją tego procesu przesyłu* (\*\*\*)

Powyższe równanie (\*) posłużyło do ilustracji modelowania pracy instalacji kolektorów solarnych.

W oparciu o model matematyczny instalacji o stałych skupionych, zaproponowano model symulacyjny obiektu oraz model odwrotny, pomocny w procesie sterowania. Model symulacyjny sterowania zbudowano wykorzystując regulator PID oraz sprzężenie zwrotne do przodu (feedforward). Model symulacyjny zbudowano w oparciu o środowisko Matlab/Simulink (na podstawie zależności (\*) opisującej instalację ACUREX, p. poz. 9 p. 3. 2. 3. /B)

Wyznaczono temperaturę medium (oleju) wpływającego z instalacji oraz przyjętych zmian bezpośredniego promieniowania słońca (irradiation) i zmian temperatury powietrza (ambient temp.) w oparciu o wzmiankowany wyżej model<sup>5</sup>.

Zmiany promieniowania słońca oraz zmiany temperatury powietrza modelowane są za pomocą funkcji czasu (Rys.4.). Model symulacyjny przetestowano dla danych pomiarowych uzyskanych z obiektu rzeczywistego w PSA. Otrzymywane rezultaty symulacji potwierdziły zgodność odpowiedzi modelu ze stanami rzeczywistymi obserwowanymi na instalacji kolektorów ACUREX. Dla oceny przydatności modelu obiektu w procesie sterowania, bardziej potrzebny jest model „odwrotny obiektu”. Dlatego też w następnym kroku zbudowano stosowny symulacyjny model odwrotny obiektu o parametrach skupionych, który dla żądanej wartości temperatury wyjściowej oleju, ustalonej temperatury oleju wpływającego do instalacji oraz przyjętych zmian bezpośredniego promieniowania słońca (Irradiation) i zmian temperatury powietrza (Ambient temp.), wyznaczy stosowną wielkość przepływu oleju przez instalację kolektorów (p. poz. 9 p. 3. 2. 3./B).



Rys. 4. (Rys. 5 Symulacje promieniowania i temperatury otoczenia (p. 3.3.2. praca 4 Diagnostyka procesu sterowania ...))

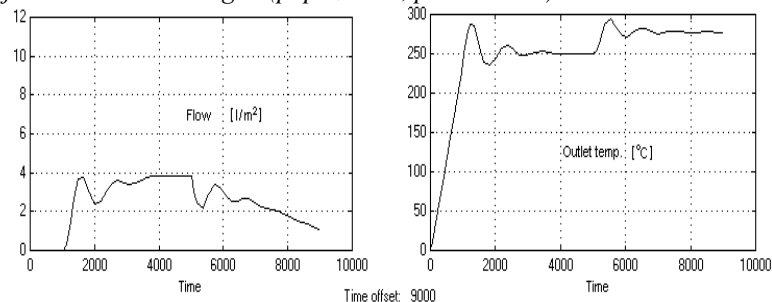
Korzystając ze zbudowanego symulatora obiektu zrealizowano zamknięty układ regulacji z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego z regulatorem PID. Schemat omawianego układu regulacji zamieszczono w Nikodem Jan et al. [Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Michał, Berenguel Manuel:

<sup>4\*</sup> Wartość  $Pc_p$  została oszacowana jako 1924 J/l°C. Na podstawie wyników doświadczeń przyjęto wartość  $H_l$  jako 1.05 kW/°C. Obie wartości wyznaczono na podstawie wyników kilkunastu pomiarów dokonanych dla różnych warunków pracy układu. Ponadto wyznaczono wartość  $C=2267\text{kJ/}^\circ\text{C}$  oraz  $n_0S=1322\text{ m}^2$ .(p. poz. 9 p. 3. 2. 3. /B)

<sup>5\*</sup> Dla danych wartości przepływu oleju (10 l/s), ustalonej temperatury oleju wpływającego do instalacji 110 °C.

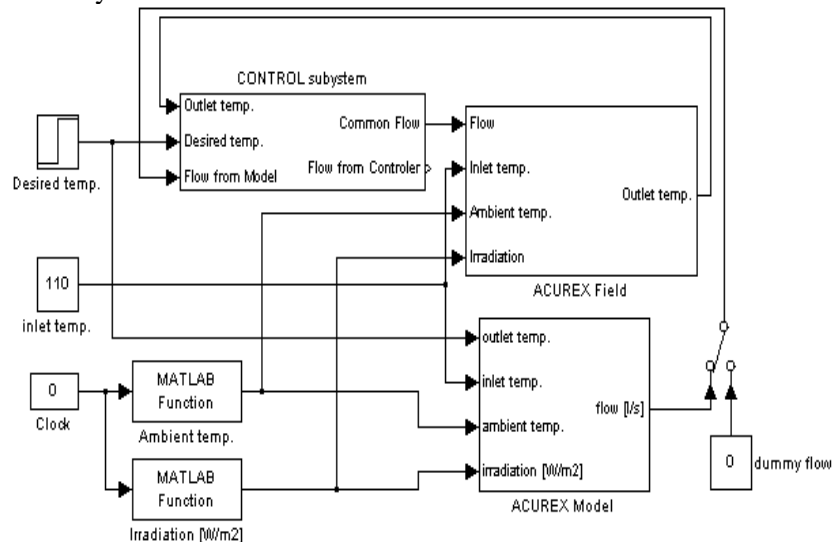
*Diagnostyka procesu sterowania instalacją pozyskiwania energii słonecznej. Pomiar, Automatyka, Kontrola. 2005, wyd. spec. 9, bis, s. 213-216; Rys. 7 (p. poz. 9 p. 3. 2. 3. /B).*

Efekty symulacji zamieszczono poniżej na Rys.5. Widoczne są przeregulowania temperatury. Są szczególnie niekorzystne, gdyż struktura przegrzanego medium (olej syntetyczny) ulega nieodwracalnej destrukcji. Pogorszeniu ulegają jego własności cieplne i stratyfikacyjne. Dlatego zalecana jest lekko oscylacyjna lub przetłumiona strategia dochodzenia do wartości zadanej. Wykorzystując model odwrotny ominięto niedogodności związane z nieliniowością obiektu. Pozwoliło to na dobranie najlepszych parametrów regulatora w pobliżu określonego punktu pracy. Zastosowanie sprzężenia typu „feedforward” z wykorzystaniem modelu odwrotnego utrzymuje punkt pracy regulatora zawsze w okolicy zera uchybu regulacji. Z opisanych modeli sterowania [Valenzuela L., Balsa P.: *A series and parallel feedforward control schemes to regulate the operation of a solar collector field, Serie Ponencias, Proceedings of the 1st Users Workshop, Almería, Spain, 1997*] typu „feedforward” przeanalizowano zarówno sprzężenie szeregowe jak również równoległe. (p. poz. 3 i 4, p. 3. 2. 3. /B).



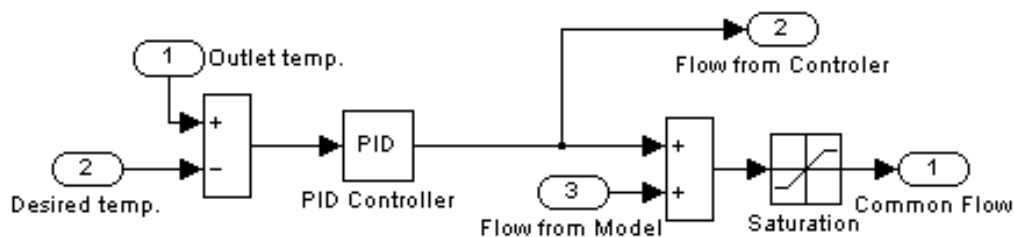
Rys.5. (Rys.8. Przebiegi przepływu i temperatury wyjściowej (p. 3.3.2. praca 4 Diagnostyka procesu sterowania ...)

Korzystanie z modelu odwrotnego obiektu oraz z pomiarów on-line zakłóceń, umożliwia kompensację wpływu zakłóceń na przebieg procesu sterowania. Natomiast pogarszają się jednocześnie własności dynamiczne układu regulacji w odniesieniu do zmian wartości zadanej. Sprzężenie szeregowe do przodu (feedforward) generuje sterowanie stosunkowo „agresywne”. Sprzężenie równoległe z kolei generuje przebiegi znacznie „spokojniejsze”, jednakże doprowadza to do wyraźnych przeregulowań. Analizując rezultaty badań w PSA [Solar thermal electricity generation, Lectures from the summer school at the P.S.A. 13-17 July 1998, Almería, Spain] zamodelowano układ regulacji ze sprzężeniem do przodu, tak jak to pokazano na Rys.6.



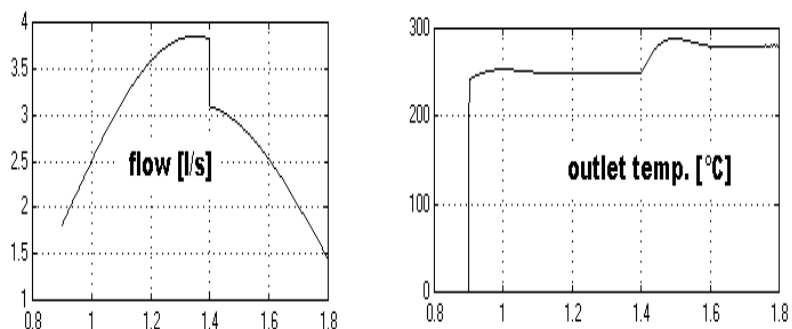
Rys.6 (Rys.9. Układ regulacji z modelem w sprzężeniu do przodu (p. 3.3.2. praca 4 Diagnostyka procesu sterowania ...)

Struktura bloku 'CONTROL subsystem' pokazana jest poniżej:



Rys.7. (Rys.10 Struktura bloku sterowania z modelem ACUREX (p. 3.3.2. praca 4 Diagnostyka procesu sterowania ...)

Rezultaty symulacji przedstawiono na Rys.8. Otrzymane wyniki potwierdzają przydatność modelu odwrotnego obiektu, jako narzędzia pozwalającego wyznaczyć nowy punkt pracy układu kolektorów słonecznych.



Rys. 8. (Rys.11. Przepływ i temperatura wyjściowa w układzie ze sprzężeniem do przodu (p. 3.3.2. praca 4 Diagnostyka procesu sterowania ...)

Parametry sterownika PID można wyznaczać zakładając liniową charakterystykę w zakresie małych odchyłeń temperatury wyjściowej od wartości zadanej. Dla każdej nowej wartości zadanej, model odwrotny wyznaczy odpowiednią wartość przepływu, a sterownik wyznaczy wielkości wynikające z bieżących zakłóceń oraz odchyłeń modelu od obiektu rzeczywistego.

Prawie całkowity brak oscylacji wielkości wyjściowej temperatury na Rys. 8 jest rezultatem zastosowania modelu odwrotnego w połączeniu z modelem obiektu. Tak dobrych rezultatów nie przyniesie zastosowanie modelu odwrotnego w połączeniu z obiektem rzeczywistym. Można jednak przypuszczać, że zgodność wyników symulacji i sterowania obiektem rzeczywistym będzie tym większa, im model lepiej będzie odzwierciedlał obiekt.

Występowanie różnic pomiędzy obiektem rzeczywistym, a jego modelem spowoduje występowanie oscylacji. Szczególnie w procesie dochodzenia układu do nowej wartości zadanej. W takiej sytuacji (oscylacje są niepożądane przede wszystkim z uwagi na możliwość przekroczenia maksymalnej temperatury pracy oleju) należy zadbać o to, aby układ regulacji został przetłumiony. Efekt taki osiągnąć można doprowadzając do wejścia 'outlet temp.' modelu odwrotnego rzeczywisty sygnał temperatury z wyjścia instalacji ACUREX, a nie sygnał wartości zadanej temperatury. Sygnał ten będzie zawsze nadążał z opóźnieniem za kolejnymi wartościami zadanymi. Spowoduje to, że wyznaczana przez model odwrotny wielkość przepływu również będzie podążała z opóźnieniem do wielkości, która zagwarantuje żadaną temperaturę wyjściową.

#### 3.3.2.4. Opis „Wieloaspektowego podejścia do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych” z wykorzystaniem techniki dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych(słonecznych) w instalacji ACUREX

W analizowanej instalacji ACUREX sterowanie i optymalizacja to krótko- i długoterminowe planowanie pracy systemów pozyskiwania energii słonecznej z uwzględnieniem warunków systemowych i ograniczeń technologicznych. Modelowanie dotyczy zarówno statycznych i

dynamicznych modeli procesów. Oprogramowania symulacyjnego tworzone jest dla potrzeb weryfikacji i poprawności opracowanych modeli oraz algorytmów sterowania i optymalnego planowania pracy w wyszczególnionych wyżej systemach.

Jak już wzmiankowano, ośrodek PSA, a instalacja ACUREX w szczególności, jest centrum badań i rozwoju technologii solarnych. Główne cele to zwiększenie ich efektywności, wydajności i obniżenie kosztów funkcjonowania systemu. Sterowanie automatyczne odgrywa istotną rolę w tych działaniach. Systemy te wykorzystują energię słoneczną skupiając ją w przewodach zawierających medium (HTF). Ogrzewane medium jest następnie wykorzystywane w procesie wymiany ciepła do generacji parowego zasilania turbiny prądowej. Przeszło 25 lat doświadczenia w eksploatacji takich instalacji w PSA, wykazała potrzebę stosowania skutecznego sterowania automatycznego operacji, a w szczególności sterowania temperaturą HTF medium. Większość opracowanych algorytmów to kombinacja sterowania feedback i feedforward (wyprzedzające). Sterowanie feedforward jest wymagane w celu zmniejszenia efektu zaburzeń sygnału sterowania [Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R. *Advanced Control of Solar Plants*. Springer 1997].

Wszystkie te publikacje skupiają się na automatycznym sterowaniu temperatury wyjściowej medium HTF. Niepodejmowano prób optymalizacji pola solarnego przez włączenie innych poziomów procesu automatyzacji dla innych punktów pracy. W rzeczywistości jest to bardzo ważne zagadnienie, ponieważ większość testowanych sterowników w instalacji ACUREX nie działa poprawnie w niektórych punktach pracy procesu, w szczególności w czasie uruchamiania i zamykania systemu. Zauważalną tendencją jest wzrost automatyzacji procesów na innych poziomach w celu poprawienia wydajności instalacji solarnej, w tym, jeśli możliwe, z wykorzystaniem techniki optymalizacji.

Dlatego też główny wysiłek dotyczył projektowania dwóch hierarchicznych metod sterowania instalacją. Pierwsza z wykorzystaniem logiki rozmytej (fuzzy logic) i druga z zastosowaniem techniki optymalizacji na bazie fizycznego modelu. Obydwa podejścia pozwalają na maksymalizowane produkcji energii elektrycznej, w obecności również ograniczeń związanych z bezpieczeństwem. Przedłużając tym samym żywotność instalacji solarnej, zmniejszając ryzyko nasycenia regulatora, które mogłyby spowodować oscylację temperatury HTF, zmniejsza potrzebę ludzkiego nadzoru i zwiększając wielkość wytworzonej energii elektrycznej bez dodatkowych kosztów.

Zagadnienia te będą omówione w oparciu o dwa poniższe artykuły (p. 3.3.2):

- Berenguel Manuel, Cirre Cristina M, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: *Hierarchical control of a distributed solar collector field. Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 614-620, lokalizacja elektroniczna [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_82](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_82),

oraz

- Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**: *Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717, lokalizacja elektroniczna <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>

Analizowane są w nich zagadnienia projektowania oraz testowania wielowarstwowych strategii sterowania hierarchicznego w instalacjach solarnych z rozproszonymi kolektorami ACUREX (PSA <http://www.psa.es/webeng/directorio.php>).

Jak wspomniano wyżej (p. 3.3.2.2), praca (2. Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: *Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 621-626, [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83)), koncentruje się na stosowaniu analizy danych w zakresie monitorowania i sterowania instalacją solarną. Główny cel analizy danych to uzyskanie użytecznej wiedzy o instalacji solarnej na podstawie danych historycznych pozyskanych z systemów monitorowania i sterowania instalacją.

W pierwszej pracy przedstawiono hierarchiczną strukturę sterowania (Rys. 3) procesem wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach słonecznych (solarnych) z rozproszonymi kolektorami. W systemach tych, medium (np. olej, woda) jest ogrzewane przez energię promieniowania słonecznego w celu uzyskaniażądanego zakresu temperatury na wyjściu instalacji, w obecności zakłóceń (głównie promieniowania słonecznego i temperatury wejściowej). Wielkość przepływu medium jest tu wielkością sterującą. Ogrzane medium jest następnie wykorzystywane do zasilania wymiennika ciepła. Powstająca para wodna umożliwia napęd generatora energii elektrycznej. Przy projektowaniu w różnych warstwach struktury sterowania stosowane są modele nieliniowe. Celem pracy jest optymalizacja procesu produkcji energii elektrycznej w elektrowniach słonecznych z rozproszonym systemem parabolicznych

kolektorów (Distributed Collector System - DCS) instalacji ACUREX. Proponowana strategia sterowania hierarchicznego składa się z następujących warstw (Rys.3):

1. Warstwa sterowania najniższego poziomu. Główny problem to optymalizacja śledzenia wartości zadanej temperatury wyjściowej (bez uwzględnienia zakłóceń). Warstwa ta realizuje swój cel za pomocą metod klasycznego, optymalnego sterowania sprzężenia zwrotnego-wyprzedzającego (feedback-feedforward) lub sterowania nieliniowego (w tym przypadku wymagane jest zastosowanie techniki linearyzacji sprzężenia (feedback linearization) (p. np. 3. 2. 3 /B, poz. 4)
2. Warstwa optymalizacji wartości zadanej. Warstwa ta odpowiada za wyznaczenie odpowiednich nastaw temperatury (w celu maksymalizacji produkcji energii), przy uwzględnieniu warunków pracy instalacji i ograniczeń.
3. Warstwa dobowego sterowania operacyjnego z określonymi horyzontami czasowymi pracy.
4. Warstwa tygodniowego planowania produkcji. Zapewniona powinna być optymalna praca instalacja w horyzoncie tygodniowym.

We wszystkich warstwach systemu, w różnego rodzaju implementacjach, podstawowym modelem jest Model PDE (równań różniczkowych cząstkowych).

Procesy dynamiczne (bilans energii) analizowanej instalacji solarnej opisywane są przez następujący system PDE:

$$\rho_m c_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t}(t, x) = \alpha G I(t) - H_l G (T_m(t, x) - T_a(t)) - L H_t (T_m(t, x) - T_f(t, x)) \quad (1)$$

$$\rho_f c_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, x) + \rho_f c_f q(t) \frac{\partial T_f}{\partial x}(t, x) = L H_t (T_m(t, x) - T_f(t, x)) \quad (2)$$

Gdzie

indeks;  $f$  odnosi się do medium;

$m$  odnosi się do metalu.

Pozostałe parametry i zmienne są określone następująco:

$t$ : czas,  $x$ : przestrzeń;

$\rho$ : gęstość medium;

$c$ : pojemność cieplna;

$A$ : powierzchnia przekroju poprzecznego;

$T(t, x)$ : temperatura medium;

$q(t)$ : wielkość przepływu medium (oleju);

$I(t)$ : skorygowana wielkość radiacji solarnej, zależna od daty i godziny;

$\alpha$  sprawność optyczna zwierciadeł;

$G$ : efektywna powierzchnia zwierciadeł;

$T_a(t)$ : temperatura otoczenia;

$H_l$ : globalny współczynnik strat termicznych;

$H_t$ : współczynnik transmisji metal-medium;

$L$ : wewnętrzna średnica przewodu transportu medium ;

$l$ : długość przewodu transportu medium;

$T_{in}(t)$ : wejściowa temperatura medium;

$T_{out}(t)$ : wyjściowa temperatura medium;

Warunki brzegowe  $T(t, 0) = T_{in}(t)$ ,  $T_{out}(t) = T(t, l)$ .

Modele (1) i (2) wykorzystywano głównie do budowy symulatora dla instalacji solarnej oraz do celów optymalizacji i sterowania [Berenguel, M., Camacho, E.F., Rubio, F.R.: *Simulation software package for the ACUREX field. Internal report ESI Sevilla. <http://www.esi.us.es/rubio> (1993)*]. Uzyskano również wersję statyczną oraz o parametrach skupionych (p. Cirre, C.M., Valenzuela, L., Berenguel, M., Camacho, E.F.: *Feedback linearization control for a distributed solar collector field. 16th IFACWorld Congress, Praha (2005)*). W tym przypadku uproszczona wersja równania bilansu energii jest dana wzorem:

$$\rho(T_m) c(T_m) A \frac{\partial T_{out}}{\partial t} = \alpha G I - \rho(T_m) c(T_m) A q \frac{T_{out} - T_{in}}{L} - \frac{\hat{H}_l(T_\alpha, T_m)}{L_t} \quad (3)$$

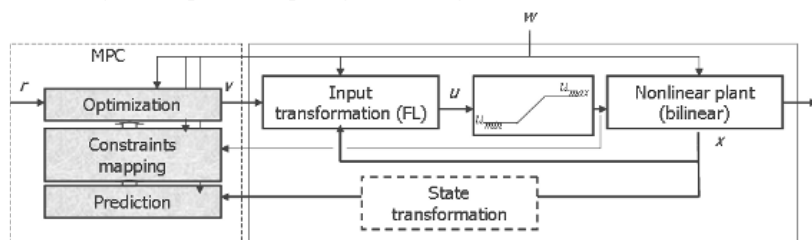
gdzie  $T_m = (T_{out} + T_{in})/2$ ,

Lt jest całkowitą długością przewodów instalacji solarnej;

$\hat{H}_l$  jest skorygowaną funkcją strat termalnych.

Interpretacja wzorów (1-3) jest analogiczna jak interpretacja w (\*\*) (p 3.3.2.3.).

Wyrażenia ze zmiennymi zależnymi od temperatury oraz wartościami parametrów w (3) można znaleźć w pracy Cirre, C.M et al. (Cirre, C.M., Valenzuela, L., Berenguel, M., Camacho, E.F.: *Feedback linearization control for a distributed solar collector field. 16th IFACWorld Congress, Praha (2005)*). Model ten jest stosowany do celów sterowania feedforward oraz sterowania linearyzacji sprzężenia (feedback linearization). Wykorzystanie sterowników feedforward w instalacji solarnej zostało wyczerpująco opisane przez Camacho, E.F et al. [Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R.: *Advanced control of solar plants. Springer-Verlag, London, UK (1997)*]. Jest to podstawą statycznej wersji równania (3), przy uwzględnieniu wartości radiacji oraz temperatury wejściowej medium. Ułatwia też linearyzację sterowanego systemu. Sterowniki feedforward mogą być instalowane zarówno szeregowo jak i równolegle ze sterownikiem feedback, p. Camacho, E.F et al. [Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R.: *Advanced control of solar plants. Springer-Verlag, London, UK (1997)*].



Rys. 9. (Fig.3 Model predictive feedback linearizing control (p. poz. 3 Hierarchical Control of

#### Ad. 1. Warstwa sterowania najniższego poziomu

Problem sterowania instalacji kolektorów solarnych polega na utrzymaniu temperatury wyjściowej medium w pobliżu pożądanego poziomu (temperatury zadanej lub odniesienia). Wartość ta powinna odpowiadać wartościom temperatury wejściowej medium, umożliwić zasilanie turbiny (około 285°C). Ponadto, w celu uniknięcia naprężeń w materiale rury absorbera, temperatura wyjściowa nie powinien być większa od temperatury wejściowej niż 80°C.

Instalacja jest narażona na zaburzenia: zmian temperatury na wejściu z powodu stratyfikacji medium w zbiorniku, zmian temperatury otoczenia i promieniowania słonecznego, zmian wynikających z cyklu dobowego lub zmian atmosferycznych (przechodzące chmury powodują szybkie zmiany temperatury wyjściowej medium). Sygnałem sterującym jest prędkość lub wielkość przepływu medium<sup>6</sup>.

Nieliniowości charakteryzujące instalację ACUREX zwiększają trudności w jej eksploatacji. Stosownie do wielkości wejściowych, wyjściowych i zakłóceń pojawiają się zmiany charakterystyk – opóźnień i stałych czasowych. Trudniejszym etapem jest eksploatacja instalacji jest rozruch. W tej warstwie stosowano różne strategie sterowania. Kilka przykładów zaawansowanych systemów sterowania może znaleźć w pracy Camacho, E.F et al. [Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R.: *Advanced control of solar plants. Springer-Verlag, London, UK (1997)*]. Korzystając z modelu (3) opracowywano metody wykorzystujące klasyczne techniki linearyzacji sprzężenia zwrotnego i predykcyjne systemy sterowania feedback linearyzacji (Rys. 9) (p. 3. 2. 3 /B, poz. 5).

#### Ad. 2. Warstwa optymalizacji wartości zadanej.

Rola tej warstwy polega na wyznaczeniu najbardziej odpowiedniej temperatury odniesienia, biorąc pod uwagę wartości zakłóceń (promieniowanie słoneczne, temperaturę wejściową medium, temperaturę otoczenia) oraz zmniejszenie zużycia energii instalacji (na przykład przez system pomp). Jeśli straty ciepła są znikome, optymalna zadana temperatura będzie blisko maksymalnej osiąganego temperaturze w operacyjnych warunkach pracy, przy uwzględnieniu ograniczeń. Ograniczenia te są związane z szybkością przepływu medium, temperaturą maksymalną i różnicami temperatur wejściowej i wyjściowej. W tej warstwie stosuje się statyczną wersję modelu (1) i (2). Ten poziom wymaga również predykcji zaburzeń w horyzoncie około 2 godzin, co jest bardzo pomocnym narzędziem przy uruchomianiu systemu. Ilustrację zastosowania tego podejścia p. Cirre, C.M et al. [Cirre, C.M., Valenzuela, L., Berenguel, M., Camacho, E.F.: *Control de plantas solares con generaci'on autom'atica de consignas (in Spanish). RIAI, 1 (2004) 46–5*].

<sup>6</sup> Obieg oleju wytwarzany jest przez pompę, która pracuje w zakresie 2 • 10-3 - 12 • 10-3 m3 s-1.

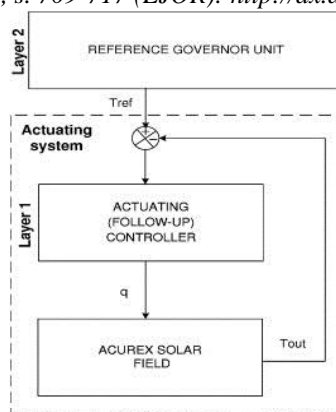
### Ad. 3. Warstwa dobowego sterowania operacyjnego

Celem tej warstwy jest określenie codziennych momentów rozpoczęcia i zakończenia eksploatacji instalacji, zgodnie z prognozą pogody, wymaganiami sieci energetycznej, zapotrzebowaniem na energię elektryczną, kosztami eksploatacji (system pomp, operatorzy, itp.), warunkami otoczenia, stanu zbiornika, awariami, itp.

### Ad. 4. Warstwa tygodniowego planowania produkcji

Warstwa ta koncentruje się na rozwijaniu tych zagadnień, które są wymagane w codziennej i okresowej optymalizacji. Jest to zagadnienie skomplikowane ze względu na trudności występujące przy opracowaniu długotrwałej prognozy pogody, zapotrzebowania na energię elektryczną. Eksploracja danych została zastosowana w celu wykrycia w zbiorach danych relacji i wzorców [Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: *Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. Lecture Notes in Computer Science. 2005, vol. 3643, s. 621-626, [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83)]. Umożliwia to wykonywane i stosowane prognoz w tej samej warstwie (np. awarie, warunki pracy, itp.). Aby przewidzieć rozwój zaburzeń zarówno dla celów optymalizacji wartości zadanej oraz optymalizacji dziennej i okresowej wykorzystano oprogramowanie stosowane w ramach automatyzacji produkcji upraw cieplarnianych [Rodriguez, F., Berenguel, M., Arahal, M.R.: *A hierarchical control system for maximizing profit in greenhouse crop production. ECC2003, Cambridge, UK (2003). 620 M. Berenguel et al.*].*

Z kolei dwuwarstwową strukturę sterowania instalacją ACCUREX (Rys.10) analizowano wzmiankowanej już uprzednio pracy: 1.Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**: *Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. European Journal of Operational Research. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717 (EJOR): <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>.*



Rys. 10. (Fig. 3 Multilayer control structure with regulatory and reference governor layers (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...))

Sterowanie hierarchiczne polega na dekompozycji oryginalnego problemu na uporządkowane hierarchicznie podzadania, a następnie obsługę każdego podzadania w określonym reżimie [Brdys, M.A. and Tatjewski, P. (2005) *Iterative Algorithms for Multilayer. Optimizing Control. Imperial College Press/World*]. Dekompozycja może być przestrzenna lub funkcjonalna. Ze względu na istotę problemów instalacji solarnej Acurex, jest tu stosowana funkcjonalna wielowarstwowa struktura sterowania. Ten rodzaj struktury sterowania badano w innych procesach, jak np. w instalacjach szklarniowych [Rodriguez, F., Berenguel, M., Arahal, M., *A hierarchical control system for maximizing profit in greenhouse crop production. In: Proc. of the ECC 2003, pp. 98 Rodriguez et al. 2003*] czy też w p 3.3.1 analizując „Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów”

Przedstawiono tu dwuwarstwowe hierarchiczne strategie sterowania dla instalacji rozproszonych kolektorów słonecznych, a także reprezentatywne wyniki testów (Rys. 13 - 16). Zwrócono uwagę na korzyści wynikające z zastosowania tej metody w porównaniu do tradycyjnej, bieżącej strategii wspomaganej przez operatora. Tradycyjną strukturę sterowania hierarchicznego w instalacji ACUREX przedstawia Rys. 10. Górna warstwa ma na celu generowanie trajektorii, dla systemu sterowania i monitorowania (zazwyczaj procedury te wykonywane są ręcznie przez dyspozytora). Dolna warstwa to system śledzenia regulacji

Celem jest automatyzacja wyznaczania optymalnych punktów pracy, w obecności ograniczeń technologicznych, przy maksymalizacji zysku z wytworzonej energii elektrycznej. W tym celu analizuje się możliwości wykorzystania metody fuzji logicznej oraz optymalizacji modelu fizycznego w górnej

warstwie struktury hierarchicznej. Głównym celem tej warstwy jest automatyczne wyznaczenie optymalnego punktu pracy instalacji. Dolna warstwa wykorzystuje wartość zadaną wyjścia generowanego przez warstwę górną do automatycznego śledzenia punktu pracy, bez względu na jakichkolwiek zakłócenia oddziałujące na instalację..

Warstwa sterowania regulatorami (warstwa 1 na Rys. 10) jest analogiczna do automatycznej regulacji temperatury wyjściowej HTF omawianej we wszystkich poprzednich publikacjach dotyczących tej instalacji [Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L., 2007a. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part i: Modeling and basic control approaches. Solar Energy. doi:10.1016/j.solener.2007.01.00; Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L., 2007b. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part ii: Advanced control approaches. Solar Energy doi: 10.1016/j.solener.2007.01.001].

Korzystając z wyznaczonej przez dyspozytora zadanej temperatury wyjściowej ( $T_{ref}$ ) (w warstwie 2 Rys. 10), sterowanie automatyczne musi tak regulować przepływ  $q$  HTF, aby osiągnąć temperaturę  $T_{out}$  jak najbliższej temperatury  $T_{ref}$ , pomimo obecności zakłóceń (promieniowania i temperatury na wejściu i przepływu HTF).

W celu uwzględnienia zakłóceń, stosowano sterowanie feedforward (wyprzedzające) (p. Rys. 11 i 12) na podstawie bilansu energetycznego w stanie równowagi w równaniu (1).

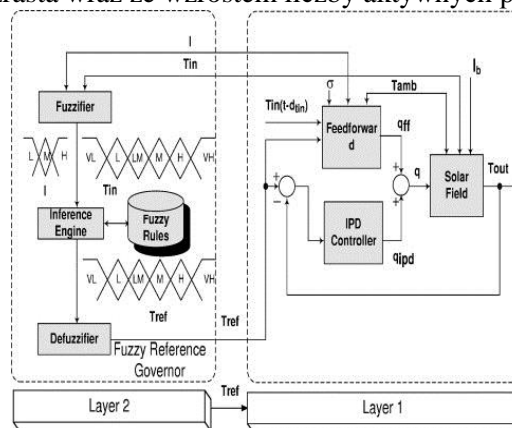
$$q_{ff} = \frac{\sigma \cdot I \cdot G \cdot L - L \cdot H_t}{\rho(T_{med}) \cdot c_p(T_{med}) \cdot (T_{ref} - T_{in})} \quad (1)$$

$$q_{ff} = \sigma \cdot I \cdot G \cdot L - L \cdot H_t \rho(T_{med}) \cdot c_p(T_{med}) \cdot (T_{ref} - T_{in}) \quad (2)$$

$$\rho(T_{med}) = 903 - 0.672 \cdot T_{med} \quad (3)$$

$$c_p(T_{med}) = 1820 + 3.478 \cdot T_{med} \quad (4)$$

Wyjściem z tego bloku feedforward jest przepływ HTF  $q_{ff}$  (w  $m^3 \text{second}^{-1}$ ) wyznaczony dla jednej z pętli kolektora. Przepływ wzrasta wraz ze wzrostem liczby aktywnych pętli (1-10).



Rys. 11 (Fig. 4) Control structure including the FRG (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221707010338?np=y>

Wielkość  $G$  jest średnicą kolektora (1.83 m),  $r$  współczynnikiem bezwymiarowym sprawności optycznej i odbicia zwiędadła,  $L$  jest długością pętli (172m),  $T_{med}$  jest średnią temperaturą wjściową (C),  $T_{in}$  i  $T_{ref}$  są pożądanymi temperaturami na wyjściu pętli wyznaczanymi przez poziom nadrzędny (C),  $T_{ambf}$  jest temperaturą otoczenia (C). Wielkość  $I$  jest skorygowaną wartością radiacji mierzoną piranometrem ( $I_b$ ) i korygowaną wielkością kosinusa kąta padania promieni słonecznych. Funkcje  $\rho(T_{med})$  i  $c_p(T_{med})$  odnoszą się do gęstości HTF ( $kgm^{-3}$ ) w równaniu (2) i pojemności cieplnej ( $Jkg^{-1}C^{-1}$ ) w (3).

$H_t$  ( $Js^{-1}m^{-1}$ ) jest funkcją strat termicznych w (4):

$$H_t = 1.12 \cdot (T_{med} - T_{amb}) - 19.8$$

Taki sposób sterowania jest odpowiedni przy pominięciu zakłóceń (filtrowanie w celu unikania nagłych zmian), ale nie jest przydatny do śledzenia wartości zadanej. W celu poprawy sterowania feedforward w stanie stacjonarnym, w przypadku zaburzenia temperatury wejściowej, należy uwzględnić opóźnienia  $d_{in}$  (w sekundach) przy pomiarach temperatury na wejściu i na wyjściu pętli. W instalacji ACUREX przeprowadzone zostały liczne eksperymenty w celu wyznaczenia tego opóźnienia w stanie stacjonarnym, w zależności od lokalizacji pętli kolektora i wielkości HTF przepływu.



Jak wspomniano powyżej, przesunięcie wynikające z uproszczenia modelu w równaniu. (1) może być wyeliminowane przez dodanie regulatora sprzężenia zwrotnego w strukturze sterowania. W tym przypadku, sterownik I-PD, modyfikacja regulatora PID (Ogata, 1998), został wybrany ze względu na prostotę. Struktura ta jest modyfikacją klasycznego PID, lecz jedynie blok całkujący jest w bezpośredniej pętli pomiędzy wejściem i wyjściem. Bloki proporcjonalne i różniczkujące są w pętli sprzężenia zwrotnego. W związku z tym, że I-PD przenosi działania proporcjonalne i różniczkujące w pętli sprzężenia zwrotnego, tak, że działania te mają wpływ tylko na sygnał zwrotny.

W celu obliczenia optymalnych nastaw stosowane są reguły logiki rozmytej (fuzzy logic) oraz metody optymalizacji oparte na modelu fizycznym w obecności zakłóceń oddziałujących na instalację. Uzyskane eksperymentalne wyniki w Plataforma Solar de Almeria pokazują zalety tych metod – podejść. Implementacje te pozwalają na maksymalizowanie zysków wytwarzania energii elektrycznej, przy uwzględnieniu ograniczeń bezpieczeństwa instalacji. Dzięki temu, zwiększona zostaje żywotność materiałów stosowanych w instalacjach solarnych. Zmniejszone zostaje ryzyko nasycenia (saturacji) regulatora. Zmniejszona jest też potrzeba nadzoru człowieka i zapewnione jest zwiększenie mocy elektrycznej bez dodatkowych kosztów.

Hierarchiczne strategie pozwalają zmniejszyć koszty eksploatacji i konserwacji jedynie poprzez zmianę oprogramowania w komputerze sterującym.

Dolną warstwę struktury sterowania realizuje kontroler I-PD oraz kontroler wyprzedzający – feedforward (Rys. 10). Jego parametry są wyznaczone w oparciu o model o parametrach skupionych uzyskany z modelu PDE instalacji solarnej, przy uwzględnieniu warunków radiacyjnych i konwekcyjnych oraz strat termalnych. Optymalizacja oparta na bazie fizycznego modelu wykorzystuje również model instalacji o parametrach skupionych w stanie ustalonym w celu uzyskania temperatury zadanej, przewidzianej dla dolnej warstwy, w zależności od aktualnych, rzeczywistych warunków pracy. Fuzzy dyspozytor "naśladuje", pracę operatora instalacji. Metody logiki rozmytej (fuzzy logic) dyspozytora są odpowiednie ze względu na jego podobieństwo do ludzkiego zachowania. Dyspozytor/operator swoje decyzje opiera na analizie wejść analogicznej instalacji (oprócz natężenia przepływu): promieniowania słonecznego i temperatury na wejściu. Są to sygnały wykorzystywane, jako wejścia dla Fuzzy Dyspozytora (FRN - Fuzzy Reference Governor). Dostępna energia słoneczna jest używana do obliczania maksymalnej temperatury wyjściowej medium pól solarnych, a temperatura wyjściowa jest związane z przyrostem ograniczeń temperatury.

#### **3.3.2.4.1. Analiza warstwy Warstwy Górnej Dyspozytora w instalacji ACUREX – (Upper layer: Reference Governor)**

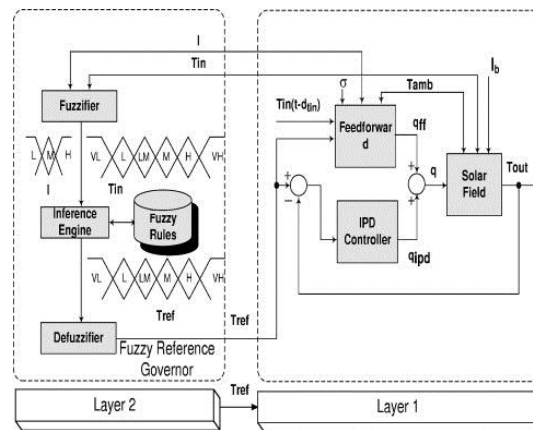
Jak uprzednio, wspomniano, przy analizowaniu czterowarstwowej struktury sterowania instalacją solarną, literatura na temat automatycznego sterowania temperaturą wyjściowej HTF (Heat Transfer Fluid) w instalacji rozproszonych kolektorów solarnych jest bardzo obszerna: [Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L., A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part i: Modeling and basic control approaches. Solar Energy. doi:10.1016/j.solener.2007.01.002 oraz Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L., A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part ii: Advanced control approaches. Solar Energy doi: 10.1016/j.solener.2007.01.001].

Jednakże, działanie instalacji nie jest jeszcze w pełni zautomatyzowane. Niektóre stany, takie jak rozruch, okresy, kiedy występują zakłócenia promieniowania słonecznego czy wahania temperatury wyjściowej, wymagają pełnego zaangażowania operatora/dyspozytora instalacji. Możliwe automatyczne wymuszenie instalacji do pracy w wyższych temperaturach może zmniejszyć żywotność urządzeń i wprowadzić siłowniki do stanu nasycenia, pojawienia się niepożądanych drgań, itp. Efektem jest znaczny spadek wydajności. Z drugiej strony, tworzenie się wartości zadanej, która jest zbyt zachowawcza (bezpieczna), może powodować straty w produkcji. Pokazane zostaną dwa różne podejścia do automatycznego określania najlepszej wartości zadanej  $T_{ref}$  (desired output temperature) dla warstwy dolnej. Uwzględnione są ograniczenia bezpieczeństwa instalacji, warunki wejściowe, aby ostatecznie zminimalizować koszty produkcji.

#### **Fuzzy Dyspozytor (Fuzzy reference governor – FRG)**

Racjonalne projektowanie (automatycznego) sterowania dyspozytorskiego (dyspozytorni) jest wzorowane na obserwacji (naśladowaniu) czynności dyspozytora instalacji solarnej. Zastosowanie tutaj logiki rozmytej wydaje się być odpowiednim narzędziem, ze względu na dużą analogię przy

podjęwaniu decyzji do ludzkiego zachowania. Dyspozytor instalacji ACUREX bierze pod uwagę wejściowe wielkości radiacji solarnej i temperatury (oraz faktyczne natężenia przepływu medium). Wielkości te mogą być sygnałami wykorzystywanymi jako sygnały wejściowe do fuzy dyspozytora (FRG- fuzy reference governor) (Rys. 11)). Do obliczania maksymalnej temperatury wyjściowej medium instalacji solarnej używany jest parametr radiacji  $I$  określający wartość energii słonecznej. Wielkość temperatury wyjściowej jest związana z ograniczeniami przyrostu temperatury. Innym rozwiązaniem byłoby dodanie wielkości przepływu medium  $q$  (HTF) jako wielkości wejściowej. Niestety, nie osiąga się wystarczającej poprawy kompensującej złożoność projektowania konstrukcji mechanizmu wnioskowania fuzy logic. Ponadto, konstrukcja zbiorów rozmytych jest łatwiejsza i bardziej intuicyjna z użyciem  $T_{in}$  (temperatury wejściowej medium) dla mechanizmu bezpieczeństwa związanego z  $\Delta T$ . Celem RFN jest znalezienie maksymalnej temperatury  $T_{ref}$ , stosownie do wielkości wejściowych radiacji  $I$  i temperatury wejściowej medium  $T_{in}$ , przy spełnieniu bieżących ograniczeń bezpieczeństwa.



Rys 12. (Fig. 7 Hierarchical control structure with optimizing reference governor (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...))

Autorzy, dzięki wieloletniemu doświadczeniu w eksploatacji instalacji ACUREX, podjęli się realizacji projektowania FRG, jak również symulatora instalacji solarnej. Wykorzystano dotychczasowe wyniki [Berenguel, M., Camacho, E.F., Rubio, F.R., *Simulation software package for the acurex field, internal report ESI Sevilla, <http://www.esi.us.es/~rubio>. 1993; i E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio Advanced Control of Solar Plants, Springer (1997)*]. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń wykorzystano różne rodzaje systemów wnioskowania fuzy logic, stosując kilka rodzajów funkcji przynależności, dyskretyzacji wejść i wyjść, itp. Badania te wykazały, że nie ma istotnej różnicy w konfiguracjach innych niż podane poniżej. Prawidłowe działanie dyspozytora nie wymagało określania większej liczby reguł. Na przykład, choć nie było to oczekiwane przez autorów, tylko trzy funkcje przynależności były wystarczające dla wielkości promieniowania słonecznego. Przy większej liczbie reguł niż trzy, fuzy dyspozytor stawał się zbyt wrażliwy na zmiany tej zmiennej, silnie wpływającej na wyjście. Konstrukcja wejścia oraz zbiory rozmyte temperatury odniesienia zostały wyznaczone z uwzględnieniem ograniczeń bezpieczeństwa instalacji (przy wzroście temperatury).

### 3.3.2.4.2. Optymalizacja Poziomu Dyspozytora (ORG - Optimizing Reference Governor) w instalacji ACUREX)

Głównym celem nadrzędnej warstwy- Optymalizacja Poziomu Dyspozytora (ORG - Optimizing Reference Governor) jest znalezienie wartości zadanej dla dolnej warstwy. ORG ma zapewnić osiągnięcie kompromisu pomiędzy kosztami wytwarzania energii elektrycznej, a zyskiem z jej sprzedaży. Optymalizacja procesu przemysłowego wymaga opracowania modelu matematycznego procesu, wraz ze zdefiniowanymi zmiennymi procesowymi, które mogą być sterowane lub regulowane. Co więcej, muszą być opracowane modele ekonomiczne procesu oraz metody optymalizacji dla sterowania niezależnych zmiennych procesowych, które maksymalizują lub minimalizują określone koszty. W tym etapie, w celu optymalizacji warstwy dyspozytora, konieczne jest obliczenie wartości temperatury odniesienia ( $T_{ref}$  lub  $T_{out}$  na wyjściu), która spełnia wymogi (ograniczenia) bezpieczeństwa, przy jednoczesnym maksymalizowaniu funkcji kosztów przedstawioną w równaniu. (7):

$$J(T_{out}) = E(T_{out}) - C(T_{out}) \quad (7)$$

gdzie  $E(T_{out})$  określa wielkość wytwarzanej energii elektrycznej w  $W_e$  a  $C(T_{out})$  określa wielkość zużycia energii elektrycznej wyrażoną również w  $W_e$  (w odniesieniu do kosztów produkcji).

Rozwiązanie określone przez funkcję kosztów  $J(T_{out})$ , ( $T_{ref}$  - zadana wielkość), musi spełniać poniższy zbiór ograniczeń.

Pierwsze ograniczenie fizycznej wydajności pomp:

$$g_1(T_{out}) + 2 \leq 0 \text{ i } g_2(T_{out}) - 12 \leq 0,$$

$$g_2(T_{out}) - 12 \leq 0.$$

Drugie ograniczenie związane z  $\dot{A}T$ :

$$T_{min} \leq T_{out} \leq T_{max}.$$

Trzecie ograniczenie – warunki bezpieczeństwa:

$$T_{min} = T_{in} + 30;$$

$$T_{max} = T_{in} + 80;$$

Gdzie

$$T_{min} = T_{in} + 30, \text{ a } T_{max} = T_{in} + 80$$

Gdzie  $T_{min}$  i  $T_{max}$  to minimum i maksimum  $T_{out}$  osiągalnej przez system.

Rozwiązanie znaleziono przy pomocy Matlab<sup>®</sup> Toolbox Optimization.

Moc cieplna dostarczona przez instalacje solarną opisuje poniższe równanie:

$$P(\underline{m}, T_{out}) = \underline{m}_{out} \cdot c_p(T_{out}) \cdot T_{out} - \underline{m}_{in} \cdot c_p(T_{in}) \cdot T_{in} [W_t] \quad (8)$$

Gdzie  $\underline{m}_{out}$  i  $\underline{m}_{in}$  są odpowiednio wejściową i wyjściową wielkością przepływu masy (w  $kg \cdot second^{-1}$ ). W stanie ustalonym  $\underline{m}_{out}$  powinno być równe  $\underline{m}_{in}$ . Zmienną sterowaną w instalacji solarnej jest mierzalny przepływ medium  $q$  (HTF,  $l \cdot second^{-1}$ ) i dla uproszczenia przepływ  $q$  na wejściu jest równy przepływowi na wyjściu: ( $q_{in} = q_{out} = q$ ).

Funkcja bilansu cieplnego  $P(q, T_{ref})$  musi być wyznaczona tylko jako funkcja temperatury. W równaniu. (9) stosowany jest uproszczony model instalacji słonecznej, w celu znalezienia związku pomiędzy wielkością przepływu  $q$  (HTF), a resztą parametrów modelu (analogiczny do bilansu energii (\*))

$$p(T_m) \cdot c_p(T_m) \cdot A \cdot \frac{dT_{out}}{dt} = \sigma \cdot I \cdot G - p(T_{in}) \cdot c_p(T_{in}) \cdot A \cdot v \cdot \frac{T_{out} T_{in} (t - d_{in})}{L} - H(T_{out}, T_{in}, T_{amb}) \quad (9)$$

W równaniu. (9)  $A$  przedstawia powierzchnię przekroju pętli przewodu rurowego,  $v = q/A$  jest prędkością przepływu medium (HTF w  $m \cdot second^{-1}$ ), a pozostałe parametry zostały zdefiniowane w równaniach: (1), (2), (3) i (4).

W stanie ustalonym równanie (9) może być wykorzystane do przekształcenia (8) do postaci:

$$P(T_{out}) = [\sigma \cdot G \cdot I - H_t(T_{out}, T_{in}, T_{amb})] \cdot L \cdot nope; \quad (10)$$

gdzie *nope* jest liczbą pętli operacyjnych (w ACUREX od 1 do 10, zazwyczaj 9 lub 10).

Ponieważ funkcja kosztów  $J(T_{out})$  jest wyrażana w  $W_e$  (Watach), to konwersję energii cieplnej na elektryczną wyznacza się korzystając z zebranych danych historycznych wydajności instalacji solarnej wytwarzającej energię elektryczną. Efektywność zbiornika energii cieplnej ustalono jako:  $P_a = 0.98$ , a konwersja energii cieplnej na elektryczną:  $P_b = 0.22$  [C. Selvage, The IEA/SSPS Solar Thermal Power Plants, vol. 2 Springer-Verlag, Berlin 1986].

Model kosztów obejmuje koszt energii elektrycznej zużywanej przez zbiór pomp medium HTF. Zależność pomiędzy przepływem  $q$  medium i zużywaną energią elektryczną określono eksperymentalnie przy pomocy modelu o parametrach skupionych (zgodnie ze wzorem (9)). Równanie (11) pokazuje model funkcji kosztu w funkcji  $W_e$ . Funkcja  $P(T_{out})$  zapewnia wymaganą wielkość przepływu  $q$  HTF utrzymującą  $T_{out}$  w zależności od poziomu  $I$ ,  $T_{amb}$  i  $T_{in}$ . W równaniu. (11),  $C_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ ; są współczynnikami parametrów zbioru pomp medium HTF i charakterystyk instalacji solarnych

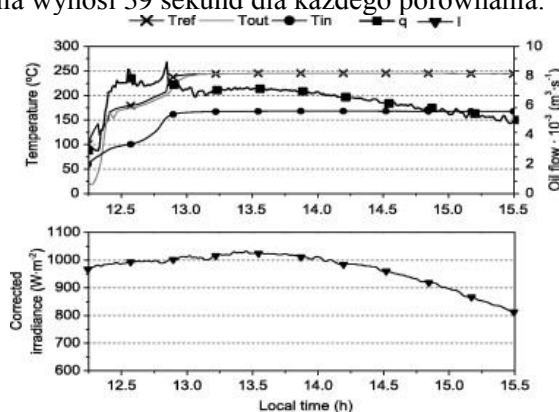
$$C(T_{out}) = (C_1 \cdot e^{(C_2 \cdot F(T_{out}, T_{in}, T_{amb}) - C_3)} - C_4 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(C_5)) \cdot C_6 \quad (11)$$

Na Rys. 12 pokazano zaimplementowaną strukturę hierarchiczną optymalizacji. Warstwa regulacji jest taka sama, jak w przypadku struktury sterowania przedstawionej na Rys.11.

Lepszy efekt polegać może na ograniczeniu wielkości  $\Delta T_{ref}$ , unikając w ten sposób znaczącej zmiany na wyjściach ORG.

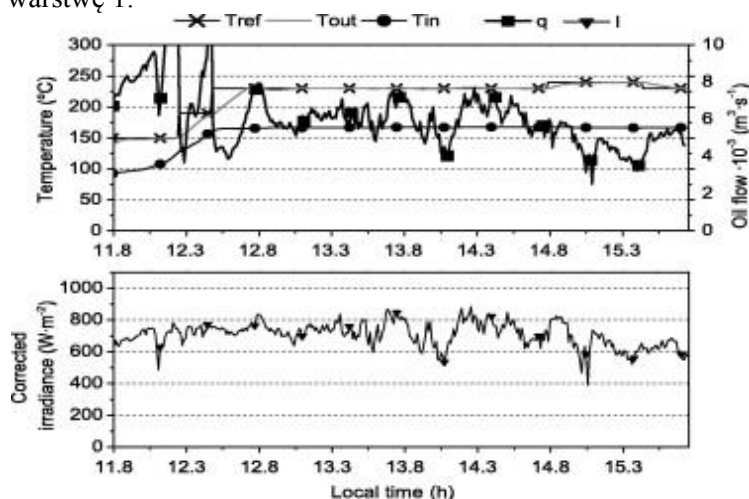
### 3.3.2.5. Analiza eksperymentów związanych z „Wieloaspektowym podejściem do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych” z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych instalacji ACUREX

Omówione będą wyniki niektórych eksperymentów przeprowadzonych w instalacji ACUREX oraz symulacji pracy tej instalacji z opisanymi powyżej metodami sterowania, optymalizacji, modelowania. Podstawowy sprzęt wykorzystywany w eksperymentach, to system komputerowy sprzęgnięty z systemem zbierania danych Data Acquisition System (DAS) poprzez intranet. Sytem DAS odczytuje sygnały, co 3 sekundy. System komputerowy zarządza również elementami instalacji solarnej (zasuwę, kolektory oraz pompy). Fuzzy Dyspozytor (Fuzzy Reference Governor (FRG)) został zaimplementowany w systemie komputerowym, a ORG – (optimizing reference governor) został zaimplementowany w środowisku Matlab®. Symulator testujący algorytmy stosowano w tych samych warunkach. Czas próbkowania wynosi 39 sekund dla każdego porównania.



Rys.13 (Fig. 8 Test developed at the real plant with the hierarchical fuzzy control scheme (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...))

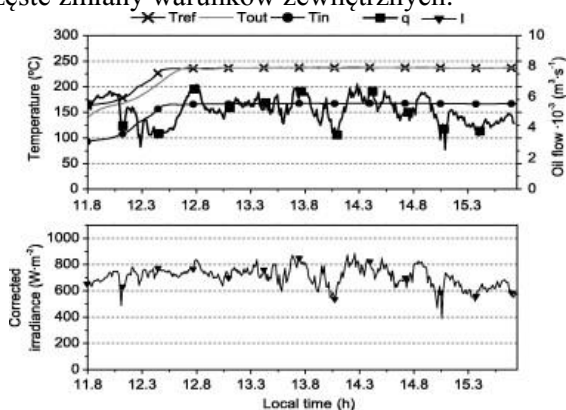
Na Rys. 13 przedstawiono rezultaty całodziennego testu zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 11. Warto zwrócić uwagę na moment uruchamiania instalacji, gdzie pokazano, jak  $T_{ref}$  generowane przez FRG zmienia się wraz ze zmianami z  $T_{in}$  i  $I$ . Około 12,75 godziny (Rys. 13) jest obserwowany jest szybki przyrost wartości  $T_{in}$  (około 60 ° C w ciągu 30 minut). Warto zwrócić uwagę, jak bardzo płynnie wielkość  $T_{ref}$  wzrasta w porównaniu z wielkością  $T_{in}$ . Ustawienie  $T_{ref}$  ręcznie spowoduje w tych warunkach prawdopodobnie nasycenie pomp. Z kolei Rys. 14 przedstawia wyniki z systemu sterowania opracowanego przez warstwę I.



Rys.14 (Fig. 9 Test developed at the real plant where the human operator impose  $T_{ref}$  and the automatic controller is formed by a feedforward in parallel with an I-PD (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...))

W rzeczywistej instalacji solarnej ACUREX (Rys.12 i 13) temperatura  $T_{ref}$  została ustalona przez operatora instalacji w czasie pracy (nie korzystano z pomocy automatycznego dyspozytora). W tym dniu, zmienność radiacji (promieniowania słonecznego) była duża z powodu chmur i mgły. Odpowiedź

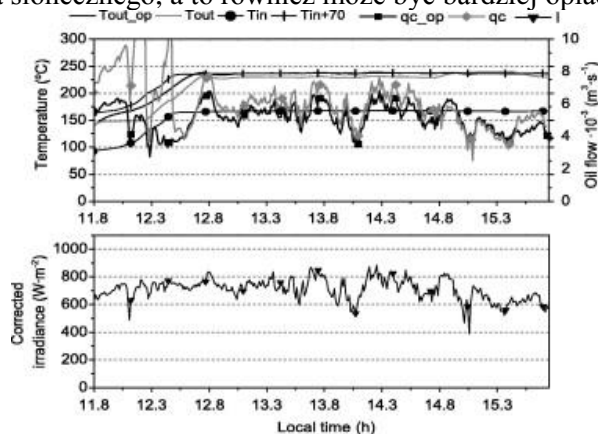
automatycznego regulatora umożliwia śledzenie wartości odniesienia z błędami mniejszymi niż  $5^{\circ}\text{C}$ , co może być uważane za dobry wynik. Jednakże, należy zaznaczyć, że przyrost  $T_{in}$  przy uruchamianiu przy zachowaniu tej samej  $T_{ref}$  nie zapewnia pożądanej odpowiedzi systemu, ponieważ zespół pomp medium HTF staje się nasycony. Operator ludzki nie może często zmieniać nastawy, a podejmowane decyzje nie muszą być dokładne w czasie pracy. Jest to bardzo trudno ocenić, czy wartość zadana jest właściwa czy też nie, ze względu na częste zmiany warunków zewnętrznych.



Rys15. (Fig. 10 Test developed in simulation with the input conditions presented in Figure 9 and the control structure shown in Figure 7. (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...)

Na Rys. 15 przedstawiono symulację ORG hierarchicznej struktury sterowania przy warunkach wejściowych takich samych jak z dnia pracy jak na Rys.14. Warunki wejściowe są takie same, więc jest to system sterowania W tym przypadku, obliczono  $T_{ref}$  z wykorzystaniem struktury ORG, a mimo zakłócenia, odpowiedź pomp nie jest nieoczekiwana. Pompa nie zostanie nasycona, a ograniczenia dotyczące bezpieczeństwa są spełnione przez cały czas.

Porównanie odpowiedzi uzyskanej z temperaturą  $T_{ref}$  została ustawiona przez operatora instalacji w czasie pracy ustalonej w czasie rzeczywistych testów i uzyskane dla tych samych warunkach z ORG przedstawiono na Rys.16. Instrukcja konserwacji zestawu  $T_{ref}$  oznacza, że operator instalacji musi zwrócić szczególną uwagę na ograniczenia operacyjne i bezpieczeństwa w każdej chwili. Jak widać w tym doświadczeniu, temperatura wyjściowa mogłaby być wyższa podczas rzeczywistego testu bez uszkodzenia pola kolektora słonecznego, a to również może być bardziej opłacalne.



Rys. 16. (Fig. 11 Comparison between the experiment shown in Fig. 9 (with  $T_{ref}$  imposed by the human operator) and Fig. 10, with the ORG (p. 3.3.2. praca 1 Reference governor ...)

Hierarchiczne struktury sterowania zostały zaprezentowane w celu optymalizacji wytwarzania energii elektrycznej generowanej w instalacjach solarnych z rozproszonymi kolektorami. Warstwy struktury zostały krótko opisane, łącznie z podaniem odniesień do powiązanych pozycji literaturowych. W warstwach dolnych generuje się podstawowe nastawy temperatury wyjściowej oraz przeprowadza się optymalizację punktów zadanych. Rozbudowano wiele modyfikacji dobrze znanych algorytmów regulacji. Prace koncentrują się obecnie na rozwijaniu tych elementów wymaganych do wykonywania dobowych i sezonowych optymalizacji. Jest to trudne zagadnienie ze względu na kłopoty występujące w długoterminowych przewidywaniach prognoz pogody oraz prognoz za potrzebowania na energię elektryczną. Zostało rozwiniętych kilka narzędzi w celu rozwiązania tych problemów.

### 3.3.2.6. Zastosowanie technik informatycznych do analizy danych związanych z „Wieloaspektowym podejściem do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych” z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych instalacji ACUREX

Główny cel zadania analizy danych to wykorzystanie użytecznej wiedzy o instalacji solarnej na podstawie danych historycznych uzyskanych z systemów monitorowania i sterowania instalacją.

Niniejsza praca: Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: *Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. Lecture Notes in Computer Science. 2005, vol. 3643, s. 621-626, [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83)*, koncentruje się na stosowaniu analizy danych w zakresie monitorowania i sterowania instalacją solarną ACUREX.. W pracy pokazano możliwości wykorzystania metod OLAP i data mining w celu wydobywania wiedzy o stanie i własnościach instalacji solarnych na podstawie baz danych systemu monitorowania. Rozwój metod i narzędzi do przechowywania dużych zasobów analitycznych (hurtowni danych) oraz sprawnych narzędzi do wielowymiarowej analizy danych OLAP (Online Analytical Processing) i eksploracji danych (data mining) umożliwił systematyczną analizę danych historycznych. Dzięki temu stało się możliwe pozyskiwanie wiedzy o stanie instalacji w różnych warunkach, zmianach stanu w czasie, itp.

Jak już wspomniano wcześniej (p. Rys.1 i 2.), instalacja ACUREX składa się z 10 pętli olejowych ogrzewanych w kolektorach solarnych o powierzchni ok. 0,25ha.

System monitoringu stanu bezpośredniego wytwarzania pary jest ważną aplikacją DSG-DISS (Direct Steam Generation - Direct Solar Steam) obiektu ACUREX, PSA. System monitorowania generuje około 700 parametrów (odczyty czujników), co 5 sekund. Parametry odnoszą się do temperatury mierzonej na wejściu i wyjściu dla poszczególnych kolektorów słonecznych, temperatury wody wtryskiwanej do instalacji, i temperatury wyjściowej pary wodnej, poziomu ciśnienia w kilku punktach pomiarowych na obiekcie (pompy, zbiorniki, kolektory, wtryskiwacze, deareatory, itp.), wielkości przepływu pary wodnej warunków środowiskowych (promieniowanie słoneczne dla indywidualnych kolektorów, temperatura otoczenia, prędkość i kierunek wiatru). Monitorowany jest również wektor wartości zadanej wygenerowany przez system sterowania do kolektorów, zaworów i pomp jak również wartości położenia oraz wartości stanu kolektorów i pomp, zaworów i innych elementów rozproszonego systemu. Podejścia zaproponowane w tej pracy obejmują zarówno OLAP – analizę danych z monitoringu instalacji (np. analiza wielowymiarowa oparta na hurtowni danych), a także data mining (eksploracji danych) danych z monitoringu instalacji. Stanowisko DISS w Plataforma Solar było pierwszą instalacją solarną na świecie, gdzie rozpoczęto analizę bezpośredniego wytwarzania pary wodnej.

Opracowany system wielowymiarowej analizy danych w instalacji ACUREX umożliwia użytkownikom wykonywanie wielu analiz. Dzięki temu możliwe jest poszukiwanie interesujących zależności danych, w tym również przez pracowników „nonexpert”. System został zbudowany przy pomocy pakietu SAS. Umożliwione jest wykorzystywanie danych z monitoringu do badania własności i zachowania instalacji w różnych warunkach, głównie atmosferycznych. Analizuje się zachowanie algorytmów sterowania utrzymujących zadaną temperaturę medium. Przykładowo kilkuletnie analizy dotyczyły reakcji sterowników w odpowiedzi na zmianę temperatury zadanej bez zakłóceń, w obecności zakłóceń temperatury wejściowej medium oraz zakłóceń w wielkości nasłonecznienia [Maciejewski Henryk, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan: *Badanie własności systemów generacji energii odnawialnej za pomocą technik OLAP i Data Mining. W: Inżynieria komputerowa. Praca zbiorowa pod red. Wojciecha Zamojskiego. Warszawa: WKE, 2005. s. 470-48*].

Zaimplementowany system w instalacji ACUREX umożliwia realizację następujących zadań:

1. Analiza cech strukturalnych DISS: degradacji systemu, wykrywania strukturalnych cech instalacji.
2. Analiza cech dynamicznych: projektowania modelowania i sterowania: Badanie wpływu zmiennych środowiskowych na stan systemu, badanie statyczne przyrostu i zmian temperatur maksymalnych i minimalnych, wykrywania stref „massive operation” (przydatne do wyboru punktu zadanego), wykrywania niedopasowania instalacji / modelu.

3. Przewidywania i modelowanie zakłóceń środowiskowych.
4. Przewidywania tolerancji błędu i diagnozy nieprawidłowej pracy instalacji: poprzez ocenę różnicy dostarczonych danych eksploatacyjnych uzyskanych z modeli i kontrolerów oraz rzeczywistych z obiektu.
5. Szkoleniowe - wyjaśniająca analiza danych dla szkolenia operatorów „nonexpert” elektrowni słonecznych, wykorzystując różne sytuacje uzyskane z eksploracji danych (na przykład, można scharakteryzować nietypowe stany instalacji, przewidywania błędów) - i prównać reakcję operatora w tej sytuacji i reakcję operatora eksperta lub reakcję automatycznego systemu sterowania.

Ważniejsze zadania analizy danych realizowane w PSA ACUREX dla potrzeb analizy danych i modelowania instalacji solarnej:

Opracowanie metod i narzędzi eksploracji danych z systemów monitorowania instalacji słonecznych w celu wspomaganie budowy i weryfikacji modeli instalacji w zmiennych warunkach środowiskowych.

Opracowanie modeli stanów instalacji słonecznej w zmiennych warunkach środowiskowych w celu wykrywania stanów awaryjnych, na podstawie danych z monitoringu z wykorzystaniem metod data mining.

Opracowanie metod modelowania zmienności warunków zewnętrznych na podstawie danych historycznych.

Opracowanie oprogramowania implementującego opracowane modele instalacji oraz zakłóceń środowiskowych. Do weryfikacji opracowanych modeli służy zaawansowana baza danych umożliwiająca analizę gromadzonych w długim okresie czasu danych w trybie on-line w oparciu o nowoczesne narzędzia informatyczne (OLAP – Online Analytical Processing czy DM – Data Mining).

Równolegle opracowywano algorytmy i modele umożliwiające prognozowanie dostępnych zasobów energii słonecznej w oparciu o pomiary własne (SolarLab i Uniw. Almerii) oraz dane satelitarne.

### **3.3.2.7. Omówienie uzyskanych efektów związanych z „Wielospektowym podejściem do zagadnień sterowania, optymalizacji, modelowania i symulacji procesów hierarchicznych” z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji w rozproszonych systemach solarnych instalacji ACUREX”**

Analizowałem realizację dwóch hierarchicznych podejść do sterowania instalacją rozproszonych kolektorów słonecznych. Stosuje się model fizyczny o parametrach skupionych instalacji solarnej w celu przedstawienia danych dotyczących produkcji energii i kosztów z nią związanych. Nieliniowe metody optymalizacji stosuje się do obliczania optymalnej temperatury odniesienia. Przeprowadzone testy w instalacji ACUREX oraz symulacje pokazują, że obie struktury hierarchiczne są w stanie na bieżąco obsługiwać obiekt (instalację solarną) bez przekroczenia ograniczeń bezpieczeństwa instalacji. Większość badanych sterowników przy uruchomieniu instalacji lub przy zmiennym zachmurzeniu wymagała ingerencji operatora. Doświadczenia pokazują, że pomoc operatora nie jest wymagana w hierarchicznej strukturze sterowania. Świadczy to o tym, że możliwa jest pełna automatyzacja instalacji wykorzystania energii słonecznej, przy uwzględnieniu ograniczeń.

W instalacji PSA w ciągu ostatnich 25 lat zostały przetestowane techniki projektowania sterowania. Omawiana struktura jest pierwszą próbą wdrożenia hierarchicznego sterowania, zorientowanego nie tylko na sterowanie temperaturą wyjściową HTF - Heat Transfer Fluid), jak dotychczas, ale także na uzyskanie maksymalnego zysku z produkcji energii elektrycznej poprzez znalezienie optymalnego punktu pracy. Automatyczny, hierarchiczny system sterowania był porównywany z systemem w którym wartość zadana ustawiono ręcznie w typowym dniu roboczym. Stwierdzono możliwość zwiększenia wydajności instalacji na kilka sposobów. Wymagana jest mniejsza ingerencja czynnika ludzkiego. Moc elektryczna instalacji kolektorów solarnych jest wyższa z hierarchicznym systemem niż przy ręcznym ustawianiem nastaw regulatora. Omówiono realizację hierarchicznych podejść do sterowania instalacją rozproszonych kolektorów słonecznych. Przy użyciu FRG (**Fuzzy Refence Governor**) sterowanie hierarchiczne wyznacza  $T_{ref}$  w każdym momencie czynnej instalacji, przy spełnionych ograniczeniach bezpieczeństwa instalacji i tylko z dwoma wielkościami wejściowymi. Przeprowadzone testy w instalacji ACUREX oraz symulacje pokazują, że obie struktury hierarchiczne są w stanie na bieżąco obsługiwać obiekt (instalację solarną) bez przekroczenia ograniczeń bezpieczeństwa instalacji.

**Mój wkład** polegał na opracowaniu fizycznego modelu instalacji PSA oraz modelu optymalizacji o hierarchicznej strukturze, zapewniającej optymalizację zadanej temperatury w dolnej warstwie systemu

sterowania. Hierarchia ta wykorzystuje dekompozycję problemu sterowania w różnych horyzontach czasowych. W rozpatrywanym problemie optymalizacji wykorzystuje się model stanu ustalonego temperatury pola kolektora słonecznego. Celem jest maksymalizacja korzyści (różnicy pomiędzy wytwarzaniem energii elektrycznej i kosztami jej produkcji) w nieliniowym procesie optymalizacji z uwzględnieniem ograniczeń gradientu temperatury i przepływu sygnału sterującego.

**Przyczyniłem się też do** określenia hierarchicznej struktury sterowania, obejmujące dolną warstwę sterowania, problem optymalizacji wartości zadanej; dobowych problemów sterowania operacyjnego i problemu planowania produkcji. Te cztery warstwy ewoluują w różnych horyzontach czasowych, w których stosowane są różne modele do celów optymalizacji. W oparciu o model PDE testowano różne modele uproszczone pola kolektora słonecznego. Zaproponowano wykorzystanie wersji statycznej do rozwiązywania dobowych problemów sterowania operacyjnego i planowania produkcji. Zaproponowano funkcję celu jako funkcję kosztów i optymalizator używany do uzyskania wartości zadanych w różnych horyzontach czasowych.

**W tej pracy, w oparciu** o wcześniejsze doświadczenia związane z realizacją „*Aspektów optymalizacji i symulacji sieci w dystrybucji mediów*”, określiłem zbiór zmiennych istotnych dla analizy wielowymiarowej przy wykrywaniu m.in. awarii instalacji, niedopasowaniu modelu instalacji. Ponadto, przyczyniłem się do określenia funkcji optymalizacji stosowanej przy agregacji zmiennych definiujących główne składniki analizy i innych technik związanych z przetwarzaniem analitycznym.

Pełna struktura hierarchiczna sterowania została przetestowana w sprawdzonym symulatorze instalacji solarnej korzystając z rzeczywistych danych wejściowych. Wyniki doświadczalne pokazują zalety tego rodzaju sterowania instalacją słoneczną.

**Eksperymenty prowadzone w ciągu ostatnich 25 lat w Platforma Solar de Almeria umożliwiły uruchomienie przeszło trzydziestu elektrowni na terenie Hiszpanii wykorzystujących zdobyte doświadczenie w PSA**

<http://www.protermosolar.com/mapa-proyectos-espana/>

### **3.3.3. Główne cele i ważniejsze osiągnięcia w zakresie „Analizy metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks)”**

Inny obszar cyklu publikacji powiązanych tematycznie w „*Wieloaspektowym podejściu do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów*” będzie omówiony na przykładzie *Analizy metod lokalizacji i symulacji w WSN*.

Od roku 1999 wspólnie z uniwersytetami w USA: Northern Arizona University, Flagstaff, oraz University of Arizona, Tucson AZ; wybrano, opracowano i przetestowano oprogramowanie niezbędne do realizacji międzynarodowych projektów w ramach Global Engineering College (GEC). Wykorzystując współczesne technologie internetowe realizowano współpracę międzynarodowych grup projektowych: „*Realizacja oprogramowania 24/7 z wykorzystaniem technik IT: Określenie zadań i narzędzi*” (24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week). Korzystając z doświadczenia uzyskanego przy realizacji projektu „24/7 Software development...” przy udziale University of Arizona, Tucson oraz University of Technology, Sydney rozpoczęto również prace związane z analizą, modelowaniem i symulacją Bezprzewodowych Sieci Czujników (Wireless Sensors Networks - WSN) – „*An improvement of energy aware routing wireless sensors network*”. Badania te rozpoczęto i kontynuowano w ramach współpracy z University of Arizona, Tucson oraz University of Technology, Sydney oraz Johannes Kepler University, Linz w latach 2001- 2009. Prace te związane były z analizą, modelowaniem i symulacją WSN. Efektem tej współpracy są liczne prace, rozdziały w książkach, referaty na konferencjach oraz złożony wniosek patentowy. Łączna liczba publikacji obejmuje 23 pozycje (p. Zał. 4.3. oraz p. 3. 2. 3. /C). Są to trzy (3) rozdziały opublikowane w książkach wydawnictwa Springer Verlag (serie Topics In intelligent Engineering and Informatics i Studies in Computational Intelligence) Jeden (1) rozdział w książce wydanej przez UBICC Publisher oraz jeden (1) rozdział w książce: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka: InTech. Publikacje w czasopismach z LM. Referaty zagraniczne na wysoko notowanych konferencjach, najczęściej pod egidą IEEE. Referaty te były wygłaszane na współorganizowanych przeze mnie konferencjach np. ostatnio z UTS, Sydney (ACASE' 12), INES' 12 i '11 '10 z Obuda University, Budapeszt; IB2COM' 11 i 10 oraz Broadbandcom'09 z UTS, Sydney i Malaga University (odpowiednio w Melbourne, Maladze i we Wrocławiu), LINDI '09 z Obuda



University, FH Hagenberg, Austria czy ECBS'07 w Tucson, z University of Arizona. Oprócz tego powstały liczne niepublikowane raporty (7) (p. Zał. 3), związane z omawianą tematyką.

Od roku 2007 uczestniczyłem w realizacji projektu:

„Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku – modelowanie i monitoring zagrożeń”: Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, 2007-2013. Numer projektu POIG.01.03.01-02-002/08

Moje wieloletnie prace związane z realizacją omówionego już tematu „Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów” oraz w zakresie „Aspektów modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych” zostały wykorzystane w trakcie prac przy realizacji tego punktu. Dzięki uzyskanemu doświadczeniu, możliwy był mój współdziałanie w pracach związanych z modelowaniem, optymalizacją i symulacją metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych.

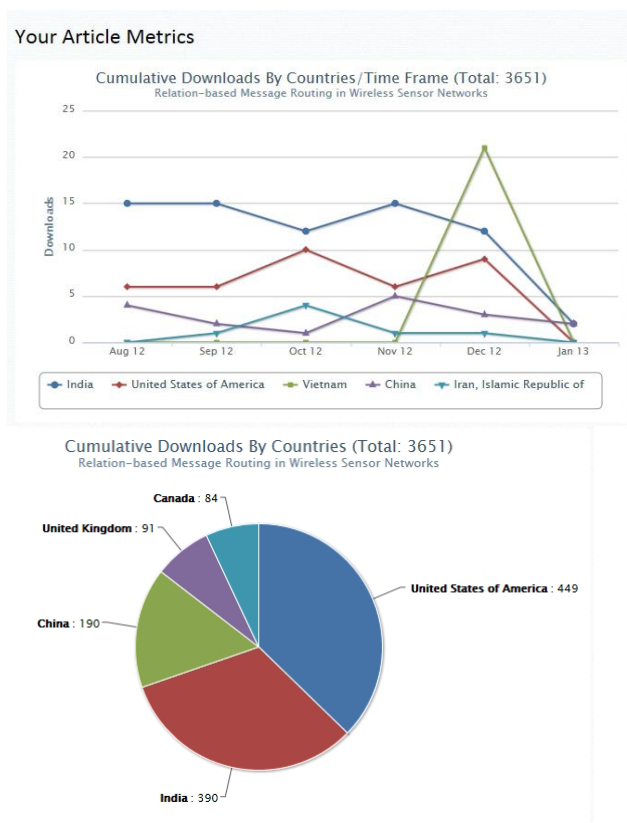
Z p. 3. 2. 3 /C (Wykaz prac składających się na cykl publikacji powiązanych tematycznie zawarty w „Wieloaspektowym podejściu do zagadnień modelowania, symulacji optymalizacji procesów” związanych z „Analizą metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN)”) wyodrębniłem cztery prace zawierające najbardziej istotne osiągnięcia w rozpatrywanym obszarze.

W nawiasie podano procentowy wkład habilitanta.

Są to następujące publikacje:

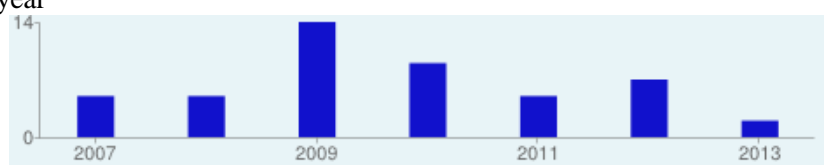
1. Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Woda Marek, **Klempous Ryszard [30%]**, Chaczko Zenon: *Relation-based message routing in wireless sensor networks: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka : InTech, 2010. s. 127-145.*
2. Nikodem Jan, **Klempous Ryszard [30%]**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Directed cooperation in multihop wireless sensors network. International Journal of Electronics and Telecommunications. 2010, vol. 56, nr 1, s. 7-11.*
3. Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard [30%]**, Nikodem Jan, Nikodem Michał P, Rozenblit Jerzy: *An improvement of energy aware routing in wireless sensors network. W: International Mediterranean Modelling Multiconference 2006. [2nd European Modeling and Simulation Symposium. EMSS 2006], Barcelona, Spain, October 4-6, 2006 / Ed. by A. G. Bruzzone [i in.]. PIERA : LogiSim, cop. 2006. s. 599-604.*
4. Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard [30%]**, Nikodem Jan, Nikodem Michał: *Methods of sensors localization in wireless sensor networks. W: Raising expectations of computer-based systems. 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems. ECBS 2007. Proceedings, Tucson, Arizona, March 26-29, 2007 / Ed. by John Leaney, Jerzy W. Rozenblit, Jianfeng Peng. Los Alamitos [i in.] : IEEE Computer Society [Press], cop. 2007. s. 145-152.*

Rozdział “Relation-based message routing in wireless sensor networks” w książce: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka: InTech, był pobierany z sieci przeszło 3 tys. razy. Z kolei referat (4) był cytowany przeszło 30 razy (p. rysunki poniżej) (dane kwiecień 2013).



Rys.1. Ilustracja pobierania rodzaju książki: Relation-based message routing in wireless sensor networks.:  
<http://www.intechopen.com/books/smart-wireless-sensor-networks/relation-based-message-routing-in-wireless-sensor-networks>

Conference name: Engineering of Computer-Based Systems, 2007. ECBS'07. 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the  
 Pages- 145-152; Publisher IEEE  
 Total citations Cited by 47  
 Citations per year



Scholar articles

*Methods of sensors localization in wireless sensor networks*, Z Chaczko, **R Klempons**, J Nikodem, M Nikodem - *Engineering of Computer-Based Systems, 2007. ECBS', 2007*; Cytowań wg Scopus : 14. wg Harzing 47.

Rys.2 Cytowania pracy: Chaczko Zenon, **Klempons Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał: Methods of sensors localization in wireless sensor networks.

### 3.3.3.1. Analiza metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN).

Jako osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego z zakresu tej tematyki badawczej wskazuję wyniki badań zawarte we współautorskim rozdziale książki InTech, dwóch referatach konferencyjnych oraz jednym artykule opublikowanym w czasopiśmie z LM (p. Zał.4.3).

Celem badań było opracowanie metodologii, formalizacji opisu i modelowania działań w Bezprzewodowych Sieciach Czujników (Wireless Sensor Networks - WSN). Dokonano oceny badanych algorytmów komunikacji w sieciach WSN. W ramach prowadzonych prac, dokonano modyfikacji algorytmów klasteryzacji (clustering) i routingu oraz śledzenia (tracking) i lokalizacji (localization). Zaproponowano relacyjne, zamiast funkcyjnego, podejście do zagadnienia routingu. W oparciu o uzyskane wyniki teoretyczne zaprojektowano i wykonano symulator sieci. Zaproponowano

również algorytmy i procedury działania czujników w WSN pozwalających zapewnić wysoki poziom bezpieczeństwa, przy zachowaniu małej złożoności pamięciowej i małych poborach mocy. Efektem końcowym badań są propozycje algorytmów i protokołów dla sieci czujników bezprzewodowych oraz badania ich praktycznych możliwości zastosowania w rzeczywistych sieciach.

Przeprowadzone badania związane były z zagadnieniami:

- modelowania współpracy elementów sieci w aspekcie działań rozproszonych oraz określania poziomów autonomii i zasięgów lokalności zdarzeń;
- ustanawiania bezpiecznego kanału komunikacyjnego oraz niezawodnego przesyłania informacji pomiędzy węzłami sieci;
- przetestowania podejścia relacyjnego, zamiast funkcyjnego, w celu poprawy efektywności (wydatku energetycznego i niezawodności) WSN.

Rozpatrywane zagadnienia są przedmiotem badań intensywnie rozwijanym przez wiele ośrodków naukowych na całym świecie. Przyczyną dużej popularności sieci bezprzewodowych są ogromne możliwości ich praktycznego zastosowania obejmującego m.in. monitoring obszarów trudno dostępnych, systemy szybkiego powiadamiania o zmianach w środowisku naturalnym (m.in. warunków hydrologicznych, ostrzeżeń o pożarach), systemy śledzenia ruchów zwierząt, pojazdów i ludzi. W zastosowaniach tych stosuje się systemy składające się z dużej liczby (zazwyczaj kilku tysięcy) sensorów posiadających zdolności pomiaru parametrów otoczenia (np.: pomiar wilgotności, temperatury, ciśnienia, określenie położenia geograficznego). Sensory mają również zdolność wykonywania prostych operacji arytmetycznych i komunikacji z innymi urządzeniami znajdującymi się w sąsiedztwie. Potrzeba komunikacji wynika z naturalnego rozproszenia systemu, co jednocześnie staje się jednym z głównych problemów współpracy elementów systemu WSN (distributed collaboration). We właściwym ułożeniu relacji współpracy upatrywana jest zdolność adaptacyjna sieci oraz odporność na przypadkowe i intencjonalne zaburzenia, zarówno wewnętrzne jak i pochodzące z otoczenia. Takie podejście wymaga zgody na rozproszenie ośrodków decyzyjnych i przyznanie autonomii elementom lokalnym. Działanie takie, aby zapobiec rozpadowi systemu, połączone być musi z mechanizmami samoorganizacji. Badanie tych współzależności to jeden z głównych celów prac.

W przypadku WSN na tego typu urządzenia nakłada się szereg ograniczeń, pozwalających zredukować ich koszty, a także zapewnić, że zasilane bateryjnie urządzenia, będzie mogły być aktywnym przez okres kilku lat. Do typowych ograniczeń należą założenia dotyczące małego poboru mocy i małych rozmiarów pamięci dostępnych dla każdego czujnika. Pierwsze ograniczenie pozwala zapewnić długi okres działania czujników, ale wymaga minimalizowania liczby komunikacji radiowych między sensorami. Jest to zgodne z wnioskami zawartymi w opracowaniu: *Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, Seth Hollar, David Culler, Kristofer PisterHill; System Architecture Directions for Networked Sensors, ASPLOS-IX 11/00 Cambridge, MA, USA; Copyright 2000; ACM 0-89791-88-6/97/05; 2000*. Autorzy wykazali, że przesłanie 1 bitu danych wymaga tyle samo energii, co wykonanie operacji arytmetycznej na 800-1000 bitach oraz wykonywanie prostych operacji arytmetycznych przez układ mikroprocesorowy czujnika. Ograniczenie ilości pamięci RAM dostępnej dla czujników, wynika ze stosunkowo dużych rozmiarów układów pamięciowych, konieczności ich zasilania w celu podtrzymania przechowywanych danych oraz stosunkowo wysokiej ceny. Ze względu na redukcję kosztów czujników zakłada się również, że układy te nie są wyposażone w sprzętowe układy zapewniające ich poprawną pracę czy wykrywające i przeciwdziałające ingerencji z zewnątrz (reverse engineering). Komunikacja radiowa stosowana w sieciach czujników wynika z faktu, że urządzenia tego typu mają pracować w rejonach trudnodostępnych lub pozostawać w ruchu (monitoring zwierząt, ludzi itp.). Najczęściej nie ma więc możliwości zastosowania sieci kablowych, a topologia sieci jest nieznaną i może się dodatkowo zmieniać (tzw. mobilne sieci bezprzewodowe - mobile ad hoc networks). Z tych względów, nawet w przypadku sieci stacjonarnych (bez ruchomych czujników), zakłada się, że czujniki rozmieszczane są w terenie w sposób losowy (najczęściej przyjmuje się założenie o rozrzuceniu ich z samolotu) Użytkownik sieci nie posiada żadnych informacji o lokalizacji czujników ani o tym, który z sensorów pozostaje w zasięgu sygnału radiowego. Powyższe założenia powodują, że zapewnienie niezawodności komunikacji, poufności, autentyczności i integralności danych przesyłanych pomiędzy węzłami jest sprawą bardzo trudną. Złożoność tego zagadnienia powoduje, że nie zaproponowano jeszcze żadnych algorytmów zapewniających bezpieczeństwo komunikacji w takiej sieci, które nie skracałyby w sposób wyraźny jej żywotności.

Dotychczasowe wyniki teoretyczne i symulacyjne w tym zakresie, zostały zaprezentowane na kilku konferencjach międzynarodowych. Zostały one poddane dyskusji i stały się podstawą do nawiązania współpracy z University of Arizona w Tucson, USA i University of Technology w Sydney, Australia.

Oprócz analiz teoretycznych, obejmujących oszacowania poboru mocy, złożoność implementacyjną, pamięciową i wymagania komunikacyjne, celem prac była praktyczna implementacja i weryfikacja proponowanych algorytmów.

Wykonanie eksperymentów na rzeczywistych układach stosowanych w tego typu sieciach jest przedsięwzięciem bardzo kosztownym (duża liczba czujników, obszar działania, infrastruktura monitorująca, zachowanie się elementów sieci). Częściej stosowaną drogą jest symulacja opracowanych algorytmów.

Dlatego wykorzystano istniejące środowiska symulacji sieci, dokonano modyfikacji w celu adaptacyjności i samoorganizacji oraz bezpieczeństwa i poufności danych. Wykonano też odpowiednie eksperymenty obliczeniowe.

Efektami końcowymi tych prac są:

- symulatory wybranych zachowań węzłów sieci z uwzględnieniem adaptacyjności i samoorganizacji;
- implementacje opracowanych modeli i algorytmów w środowisku symulatorów opracowanych w ramach przeprowadzonych badań;
- publikacje teoretyczne z zakresu adaptacyjności i samoorganizacji oraz bezpieczeństwa i ochrony komunikacji w bezprzewodowych sieciach czujników.

### 3.3.3.2. Analiza metod modelowania zagadnień współpracy elementów WSN

Modelowanie procesów komunikacyjnych w bezprzewodowych sieciach czujników obejmuje trzy zagadnienia.

- Pierwszym jest zapewnienie niezawodnej funkcjonalnie komunikacji (dependability) pomiędzy poszczególnymi elementami sieci niezależnie od ich lokalizacji. W tym zakresie zamodelowane zostały znane z literatury algorytmy samoorganizacji sieci (clusteringu, routingu). Do analizy warunków ich funkcjonalności zostały wykorzystane rezultaty uzyskane w ramach:
  - optymalizacji routingu w sieciach komputerowych;
  - sieci ad hoc;
  - adaptacyjnych metod minimalizacji zużycia energii na cele komunikacyjne.
- Drugim zagadnieniem jest zbadanie możliwości zarządzania siecią czujników oraz zapewnienie niezawodności poprzez dokładanie nowych i usuwanie zbędnych lub niepoprawnie działających czujników. Zakłada się tu, że koordynator sieci i/lub określone węzły powinny mieć możliwość wykluczania wybranych węzłów z dalszej komunikacji. Możliwość taka ma na celu zapewnienie odporności sieci na zagrożenia wynikające z niepoprawnie działających węzłów. Może to być efektem uszkodzenia czujnika bądź też jego przejęcia przez nieuprawniony obiekt. Analiza zachowań sieci opiera się w znacznej mierze na wykorzystaniu własności topologicznych sieci oraz organizacji pracy złożonych systemów o strukturze sieciowej (systemy wieloagentowe, holoniczne, hierarchiczne).
- Trzecim zagadnieniem jest struktura logiczna sieci, pozwalająca określić ścieżki komunikacji i przesyłania danych pomiędzy poszczególnymi czujnikami i stacją bazową (BS). Opcjonalnie, BS jest głównym węzłem sieci odpowiedzialnym za gromadzenie danych. Tworząc takie ścieżki, dąży się do minimalizacji liczby komunikatów przesyłanych w sieci.

W ramach prowadzonych prac zaproponowano modyfikacje algorytmów klasteryzacji (clustering) i routingu oraz śledzenia (tracking) i lokalizacji (localization). Zaprojektowane i wykonane zostały symulacje oraz dokonana została wizualizacja badanych algorytmów komunikacji w sieciach WSN. Zmiany te pozwoliły na:

- modelowanie zagadnień współpracy elementów sieci w aspekcie działań rozproszonych oraz określania poziomów autonomii i zasięgów lokalności zdarzeń,
- ustanawiania bezpiecznego kanału komunikacyjnego oraz niezawodnego funkcjonalnie (dependable) przesyłania informacji pomiędzy węzłami sieci.

Zwykle zakłada się, że pozycje czujników są nieznane, a wszystkie decyzje podejmowane są na podstawie informacji lokalnej czujnika. Dla takich sieci bezprzewodowych czujników (WSN) rozwija się algorytmy routingu i samoorganizacji. To założenie sprawia, że WSN są bardziej elastyczne i

energetycznie oszczędne. Podejmowanie decyzji lokalnie jest szybsze i energooszczędne. Należy jednakże określić pozycję czujnika.

W pracy:

Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał: *Methods of sensors localization in wireless sensor networks.: Raising expectations of computer-based system., 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems. ECBS 2007. Proceedings, Tucson, Arizona, March 26-29, 2007 / Ed. by John Leaney, Jerzy W. Rozenblit, Jianfeng Peng. Los Alamitos [i in.] : IEEE Computer Society [Press], cop. 2007. s. 145-152.( p. 3. 2. 3. C) oraz Zał. 4.3. badano algorytmy samoorganizacji oraz algorytmy routingu w WSN. Jak to już wyżej stwierdzono, położenie sensorów jest nieznane i wszelkie decyzje są generowane na podstawie lokalnej informacji. Dzięki temu sieć staje się bardziej elastyczna i zmniejszone jest zużycie energii. Lokalne decydowanie jest szybsze i bardziej efektywne energetycznie. Opisanie były różne metody znajdowania lokalizacji transceiverów w WSN. Analizowano przeniesienie funkcji lokalizacji od stacji bazowych do każdego czujnika. Zaproponowano ocenę zaproponowanych metod przy użyciu symulacji. Założono, że pozycje sensorów są przypadkowe i nieznane. [Z. Chaczko, F. Ahmad, *Wireless Sensor Network Based System for Fire Endangered Areas, ICITA 2005, Sydney, July 2005*; Z. Chaczko, R. Klempous, J. Nikodem, M. Nikodem, J. Rozenblit, *An Improvement of Energy Aware Routing in Wireless Sensors Network, European Modeling and Simulation Symposium, Barcelona, Oct 2006*; O.Younis, S.Fahmy, *HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks, IEEE Transactions On Mobile Computing, VOL. 3, NO. 4, Oct-Dec 2004*]. Protokoły dedykowane WSN posiadają takie struktury prawidłowej pracy, bez znajomości lokalizacji sensorów.*

Ale informacja o lokalizacji jest niezbędna, w przypadku, gdy potrzebna jest znajomość lokalizacji zdarzeń. Zazwyczaj sensory nie są wyposażone w GPS. Dlatego istnieje potrzeba zastosowania algorytmów lokalizacji sensorów w danym obszarze. [M. Anlauff, A. Sunbul, *Deploying localization services in wireless sensor networks, Distributed Computing Systems Workshops, 2004. Proceedings. 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'04) 0-7695-2087-1/04 \$20.00 © 2004, IEEE*; N. Patwari, J.N. Ash, S. Kyperountas, A.O. Hero III, R.L. Moses, N.S. Correal, *Locating the Nodes. Cooperative localization in wireless sensor networks, IEEE Signal Processing Magazine, July 2005*; I. Stojmenovic, *Handbook of Sensor Networks, A John Wiley & Sons Inc., 2005*].

Podstawowym zagadnieniem jest określanie lokalizacji każdego sensora w obszarze 2D. Lokalizacja węzłów w WSN bazuje na trzech podstawowych metodach:

1. Metoda AoA (Algorithm. Angel of Arrival - AoA) umożliwia wyznaczenie lokalizacji, dzięki znajomości kątów (kierunku), z których węzeł otrzymuje komunikat od dwóch punktów  $(x_1, y_1)$  i  $(x_2, y_2)$  o znanych współrzędnych.
2. Metoda ToA (Time of Arrival - ToA), czyli wyznaczanie położenia sensora w oparciu o znajomość czasu pomiędzy wysłaniem a otrzymaniem sygnału. Zakłada się znajomość odległości od trzech punktów  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  i  $(x_3, y_3)$  o znanych współrzędnych.
3. Metoda RSS (Receive Strenght Signal - RSS ), czyli wielkość mocy odbieranego sygnału.

Metody AoA, ToA i TdoA (Time Difference Of Arrival) wymagają użycia anteny kierunkowej, co czyni te metody nieprzydatnymi do zastosowań w WSN. Metoda trzecia wykorzystuje znajomość położenia trzech punktów  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$  i  $C(x_3, y_3)$ . Szukamy lokalizacji punktu  $P(x, y)$  odległego odpowiednio od A, B, i C o  $d_1$ ,  $d_2$ , i  $d_3$ . Jeśli punkty A, B, C nie leżą na prostej i żadne dwa nie mają identycznych współrzędnych, to lokalizacja punktu P jest wyznaczona jednoznacznie. Metoda ta oparta na ocenie odległości między węzłami jest bardziej interesująca. Jest związana z warunkami propagacji sygnału. Najważniejsze parametry to tłumienie i opóźnienie. Jeśli sygnał o mocy  $P_0$  jest wysyłany w chwili  $t$ , to jego moc w odległości  $d_1$  jest równa:

$$P_1 = \frac{P_0}{d_1^m} \quad (1)$$

A wartość opóźnienia:

$$t_1 = \frac{d_1}{v} \quad (2)$$

W (1) and (2)  $d_1$  jest odległością między dwoma punktami,  $m$  jest stałą zależną od środowiska i  $v$  szybkością propagacji sygnału w tym środowisku. Zatem obydwa parametry mogą być stosowane do wyznaczania  $d_1$ .

Algorytm (ToA) [T.Y. Chen, C.C. Chiu, T.C. Tu, *Mixing and Combining with AOA and TOA for Enhanced Accuracy of Mobile Location*, IEE, Michael Faraday House, Stevenage, 2003; 8 Deng, P.; Fan, P.Z., "An efficient position-based dynamic location algorithm," *Autonomous Decentralized Systems*, 2000. *Proceedings. 2000 International Workshop on*, pp.36,39, 2000; doi: 10.1109/IWADS.2000.880881; N. Patwari and A.O. HeroIII, "Location Estimation Accuracy in Wireless Sensor Networks," *Proc. Asilomar Conf. Signals and Systems*, Nov. 2002; A. Tarighat, N. Khajehnouri, A.H. Sayed, *Improved Wireless Location Accuracy Using Antenna Arrays and Interference Cancellation*, *Conference: Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2003, DOI: 10.1109/ICASSP.2003.1202718, 2003. *Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on*, Volume: 4] wykorzystuje opóźnienie sygnału. Jeśli sensor P o nieznannej pozycji (x,y) wysyła sygnał s(t), to postać odbieranych sygnałów jest następująca

$$y_j(t) = k \cdot s(t - t_j) \quad (3)$$

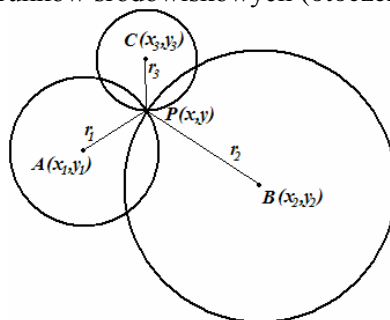
Gdzie  $j = 1,2,3$  odnosi się do odbiorników ulokowanych znanych punktach  $(x_j, y_j)$ . Punkty te mogą być łatwo wyznaczone, zakładając odpowiednią synchronizację odległości między nadajnikiem, a odbiorcami. W przeciwnym przypadku, należy zastosować metode Time Difference of Arrival (TDoA) [L. Cong, W. Zhuang, *Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems*, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.1, No.3, July 2002; F. Gustafsson, F. Gunnarsson, *Positioning Using Time- Difference of Arrival Measurements, Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2003. *Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on*, pp.VI - 553-6 vol.6, DOI: 10.1109/ICASSP.2003.1201741 ]

Jeśli nadajnik P wysyła wiadomość, to analizując korelację (opóźnienia) otrzymanego sygnału u więcej niż dwu odbiorników, możemy obliczyć odległość pomiędzy punktem P (o nieznanych, szukanych współrzędnych), a każdym z odbiorników (o znanych współrzędnych).

W odróżnieniu od metod ToA i TDoA, metoda RSS (Receive Signal Strength) nie wykorzystuje opóźnienia sygnału, oparta jest na analizie jego mocy [A. Ault, X. Zhong, E. J. Coyle, *K-Nearest-Neighbor Analysis of Received Signal Strength Distance Estimation Across Environments*, *1st workshop on Wireless Network Measurements*, 2005; N. Patwari and A.O. HeroIII, "Location Estimation Accuracy in Wireless Sensor Networks," *Proc. Asilomar Conf. Signals and Systems*, Nov. 2002]. Jeśli jest znana moc transmitowanego sygnału  $P_0$ , to odległości między sensorami mogą być określone dzięki pomiarowi odbieranego sygnału  $P_1$  według wzoru:

$$d_1 = m \sqrt{\frac{P_0}{P_1}} \quad (4)$$

Zakładamy, że moc sygnału maleje wraz z odległością. Niedogodnością tej metody jest konieczność szacowania stałej m zależnej od warunków środowiskowych (otoczenia).

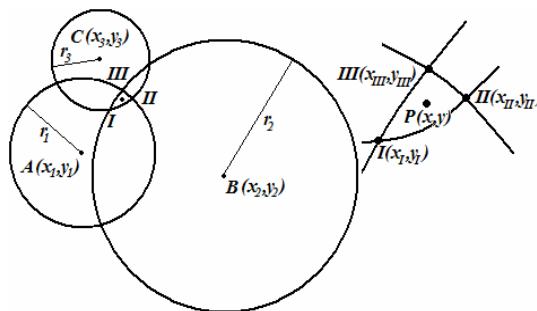


Rys <sup>7</sup>. 1. (Fig.2. Finding point's position knowing distance to three known points, Methods of sensors...).

Na Rys. 1 pokazano w jaki sposób znając odległość od trzech różnych punktów A, B, i C, współrzędne punktu P można obliczyć, niezależnie od tego, jaką metodę stosujemy do wyznaczania odległości. Jeśli odległości  $r_1, r_2$  i  $r_3$  oszacowane są z pewnym błędem to pojawia się problem.

<sup>7</sup> W rozdziale tym rysunki i tabele opisywane są według reguły: najpierw kolejny numer rysunku, dalej numer rysunku i jego opis z omawianej pracy zgodnie z listą prac (1 do 4) w p. 3.2.3 /C Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał: *Methods of sensors localization in wireless sensor networks.: Raising expectations of computer-based system.*, 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems. ECBS 2007. *Proceedings, Tucson, Arizona, March 26-29, 2007* / Ed. by John Leaney, Jerzy W. Rozenblit, Jianfeng Peng. Los Alamitos [i in.] : IEEE Computer Society [Press], cop. 2007. s. 145-152. W nawiasie podany jest skrót tytułu tej pracy.

Na Rys. 2. pokazany jest model zdarzenia, w którym, ze względu na błędy w oszacowaniu odległości, nie jest możliwe wyznaczenie jednego punktu określającego położenie punktu P (nadajnika).



Rys. 2.(Fig.4. Finding point's position knowing distant to three known points with some error. Methods of sensors...).

Aby znaleźć lokalizację tego punktu, wyznaczamy zbiory punktów I, II i III jak na Rys. 2. Aby znaleźć lokalizację P, wyznaczmy najpierw zbiór punktów wyznaczonych przez odległości między nieznanym węzłem/wierzchołkiem, a dwoma znanymi wierzchołkami (Rys. 3,). Na przykład współrzędne punktu III( $x_{III}, y_{III}$ ) mogą być wyznaczone jak podano poniżej:

$$x_{III} = x_1 + r_1 \cos(\alpha \pm \beta) \quad (5)$$

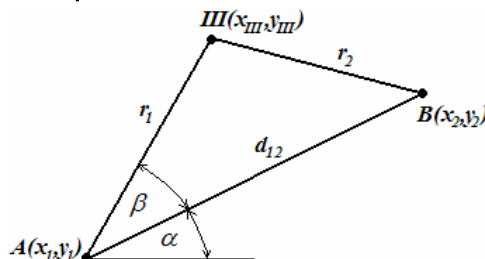
$$y_{III} = y_1 + r_1 \sin(\alpha \pm \beta) \quad (6)$$

Gdzie

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (7)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + d_{12}^2}{2r_1 d_{12}}\right) \quad (8)$$

$$d_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$



Rys. 3 (Fig.5. A method of finding unknown node position, Methods of sensors...).

Dwa wierzchołki A i B ze znanymi współrzędnymi ( $x_1, y_1$ ), ( $x_2, y_2$ ) i nieznanym wierzchołkiem III( $x_{III}, y_{III}$ ) tworzą trójkąt o znanych bokach. Korzystając z twierdzenia kosinusów możemy otrzymać wzór:

$$r_2^2 = r_1^2 + d_{12}^2 - 2r_1 d_{12} \cos \beta \quad (10)$$

Wzory (5-7) wynikają również z zależności trygonometrycznych.

Znając lokalizację punktów I, II i III możemy oszacować współrzędne ( $x, y$ ) punktu P, jako:

$$x = \frac{x_1 + x_{II} + x_{III}}{3} \quad (11)$$

$$y = \frac{y_1 + y_{II} + y_{III}}{3} \quad (12)$$

Jak pokazano, lokalizacja węzła III może być wyznaczona przy wykorzystaniu trzech transceiverów o znanej lokalizacji i odległości między nimi a węzłem III. Typowy sposób lokalizacji w WSN polega na rozmieszczeniu kilku stacji bazowych (BS). BS nazywane są często „kotwicami”, gdyż współrzędne są znane. Należy tak rozmieszczać BS, aby każdy punkt obszaru WSN został pokryty, przez co najmniej trzy BS. W ten sposób będzie mógł być zlokalizowany każdy punkt obszaru WSN.

Metoda ta znana jest z technologii GSM [Varshavsky A. ; Chen, M.Y. ; de Lara, E. ; Froehlich, J. ; Haehnel, D. ; Hightower, J. ; Lamarca, A. ; Potter, F. ; Sohn, T. ; Tang, K. ; Smith, I.; Are GSM Phones THE Solution for Localization?; *Mobile Computing Systems and Applications*, 2006. WMCSA '06. *Proceedings. 7th IEEE Workshop on Page(s): 34 – 42; DOI: 10.1109/WMCSA.2006.2*], gdzie BS są wykorzystywane do lokalizacji pozycji stacji mobilnych. Punkty określone za pomocą GPS noszą też nazwę „latarni”. W systemach WSN najprostszy sposób lokalizacji wymaga rozmieszczenia trzech BS w danym obszarze. Jeśli BS mogą komunikować się z każdym innym węzłem sieci, to każda pozycja sensora może zostać wyznaczona. Niestety, metoda ta jest mało praktyczna ze względu na niedużą możliwość pokrycia całego obszaru przez jedynie trzy BS. Stosowanie większej liczby BS zwiększa znacząco koszty. Ponadto, obszar aktywności WSN może nie być w pełni dostępny i rozmieszczenie dodatkowych stacji może być niemożliwe. Proponuje się transfer BS do każdego sensora. Ponieważ sensory mogą komunikować się wzajemnie, można zatem oszacować odległości między nimi. Dzięki temu można lokalizować dowolny sensor wykorzystując inny sensor o znanych współrzędnych.

Jak wspomniano powyżej, WSN jest zbudowana zazwyczaj z wielu jednorodnych czujników rozmieszczonych losowo w pewnym obszarze. Mogą one komunikować się ze sobą i można oszacować odległości między nimi stosując omawiane algorytmy lokalizacji (na przykład RSS, ToaA). Oczywiście, nie dysponuje się nieograniczoną liczbą czujników zbierających dane o odległości do innych czujników. Jednak przy pomocy każdego z czujników można określić odległość do wszystkich innych czujników, będących w jego zasięgu (sąsiadów). Gdy sieć składa się z  $N$  czujników, wówczas dowolny węzeł konstelacji węzłów może być w pełni opisany przy pomocy macierzy  $N \times N$ .

Elementy tej macierzy  $d_{ij}$  są równe odległości między sąsiednimi węzłami  $i, j$  ( $i, j = 1 \dots N$ ). Jeśli węzły  $i$  oraz  $j$  są zbyt daleko, aby komunikować się, to  $d_{ij} = -1$ , i  $0$  dla  $j = i$ . Aby określić położenie węzła pozycji  $i$ , niezbędna jest znajomość przynajmniej trzech elementów  $d_{ij} > 0$ , gdzie  $j = 1, \dots, N$  z  $j \neq i$ . Aby określić lokalizację sensorów, należy pozycję jednego z nich ( $i$ ) przyjąć na początku jako  $(0,0)$ . Następnie pozycję innego czujnika  $j$  określa się jako  $(0, d_{ij})$  gdzie  $d_{ij} > 0$ . Stosując odległości  $d_{ik}$  i  $d_{jk}$  ( $d_{ik} > 0$  i  $d_{jk} > 0$ ) można znaleźć dwa dopuszczalne położenia czujników  $k, i$ . Powinno być wybrane jedno z tych położenia. W ten sposób można określić pozycje trzech czujników. To pozwala określić położenie każdego czujnika, który może komunikować się z czujnikami  $i, j$  i  $k$ . Każdy czujnik, którego pozycja została w ten sposób określona, może być wykorzystany w celu znalezienia pozycji innego czujnika. Jeśli każdy czujnik ma połączenie komunikacyjne, z co najmniej trzema innymi czujnikami, które to założenie można przyjąć, ze względu na nadmiarowość liczby węzłów w WSN, to mogą być obliczone pozycje wszystkich czujników.

Wstępnie założono znajomość pozycji trzech czujników, więc dysponujemy obliczoną konstelacją. W niektórych zastosowaniach znajomość położenia nie jest bezwzględnie konieczna. Możemy sobie wyobrazić sensory z możliwością ruchu, a celem sieci jest równomierne pokrycie obszaru. W takich sytuacjach wystarczająca jest znajomość jedynie konstelacji czujników, bez znajomości ich lokalizacji. Aby znaleźć pozycję absolutną, należy umieścić BS i znaleźć odległość do każdego z trzech czujników. Pozycja absolutna, jest to specyficzna pozycja względna odniesiona do sąsiadów. Obszar sąsiedztwa ograniczony jest przez wartość  $R$  (sensor range). Obszarem sąsiedztwa jest wtedy cała sieć. W sieci należy wybierać jeden układ odniesienia - początek układu współrzędnych kartezjanskich  $(0,0,0)$ . Punktem tym może być wybrana stacja bazowa albo punkt leżący na obrzeżach obszaru sieci (np. w wierzchołku prostokąta określającego obszar rozmieszczenia czujników). Na rys. 6b takim punktem może być wierzchołek ze stacją bazową BS1. Wtedy pozycja absolutna punktu  $P$  wyznaczana jest jako trójka  $(x,y,z)$  z odległości  $P$  od BS1.

Przedstawiona powyżej metoda ma zalety. Na przykład, za pomocą czujników wilgotności, węzły mogą oszacować tłumienie, a dokładne wyniki uzyskuje się dzięki algorytmowi RSS. Nie jest konieczne rozmieszczenie BS na całym obszarze (wystarczy jeden BS). Zazwyczaj w WSN jest stosowana klasteryzacja, więc sieć jest podzielona na klastry z jednym Cluster Headem – CH (węzłem głównym) i pewną liczbą czujników w każdym klastrze [Z. Chaczko, F. Ahmad, *Wireless Sensor Network Based System for Fire Endangered Areas, ICITA 2005, Sydney, July 2005*; Z. Chaczko, R. Klempous, J. Nikodem, M. Nikodem, J. Rozenblit, *An Improvement of Energy Aware Routing in Wireless Sensors Network, Europe*; O. Younis and S. Fahmy, "HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks"; *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 366-379, Oct.-Dec. 2004]. Przedstawimy algorytm umożliwiający węzłom głównym (CH) wyznaczenie konstelacji w klastrze. Ta wiedza może być przydatna podczas ponownego grupowania, które jest niezbędne w WSN z klasteryzacją.



Możliwość wykorzystania sensorów jako BS w celu lokalizacji innych sensorów ma wiele zalet. Jeżeli jednak oszacowanie położenia czujnika jest błędne, to będzie to wpływać na kolejne szacowania lokalizacji. W celu unikania propagacji błędów, należy starannie dokonywać wyboru czujników wykorzystywanych do lokalizacji innych czujników. Jak pokazano na Rys. 2 i 3, aby zlokalizować czujnik i znając odległości do węzłów A, B i C (znane są położenia tych punktów), należy najpierw znaleźć położenie punktów I, II i III (Rys.4). Czujnik i o współrzędnych (x,y) może być wyznaczony, jako

$$x = \frac{x_I + x_{II} + x_{III}}{3};$$

$$y = \frac{y_I + y_{II} + y_{III}}{3}.$$

W celu przybliżenia oszacowania pozycji węzła, proponuje się wyznaczenie parametru  $e$  - dokładności oszacowania jako:

$$e = a + b + c; \quad (13)$$

gdzie

$$a = \sqrt{(x - x_I)^2 + (y - y_I)^2} \quad (14)$$

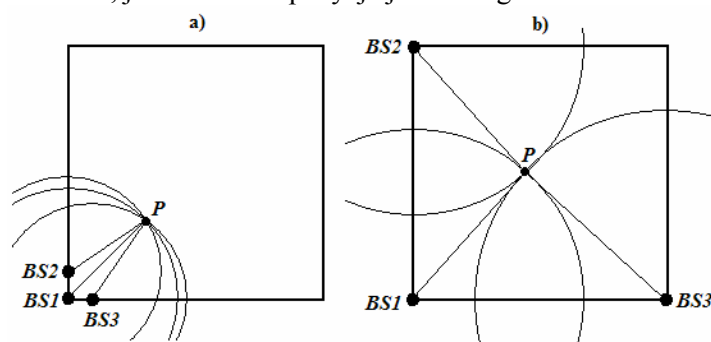
$$b = \sqrt{(x - x_{II})^2 + (y - y_{II})^2} \quad (15)$$

$$c = \sqrt{(x - x_{III})^2 + (y - y_{III})^2} \quad (16)$$

Oczywiście, że dla pozycji dokładnie oszacowanych,  $e$  jest równe zero. Duża wartość  $e$  nie oznacza, że współrzędne zostały źle oszacowane, lecz jedynie są bardzo duże rozbieżności w obliczaniu punktów I, II i III.

Parametr  $e$  może być wykorzystywany do zmniejszenia propagacji błędów lokalizacji czujników. Aby znaleźć położenie czujnika  $i$ , należy używać odległości między węzłem  $i$  oraz trzema innymi węzłami o znanych położeniach. W celu redukcji propagacji błędów w procedurze lokalizacji czujnika należy wybrać trzy czujniki o najniższym parametrze  $e$ . W ten sposób tylko wiarygodne węzły zostaną wykorzystane do znajdowania innych pozycji czujników. Parametr  $e$  jest proponowany jako kryterium wyboru trzech węzłów niezbędnych do wyznaczenia lokalizacji innego czujnika. Węzeł A wybiera się tak, aby parametr  $e$  był najmniejszy  $e_A$ , a węzeł B z najmniejszą wartością  $e_B \geq e_A$  taką, że B jest co najmniej  $\varepsilon$  odległy od węzła A. Wybór węzła C należy dokonać tak, aby  $e_C \geq e_B$ , a najmniejszy kąt w trójkącie utworzonym przez sensory A, B i C był większy niż  $\gamma$ .

Staranny dobór  $\varepsilon$  i  $\gamma$  zwiększa prawdopodobieństwo tego, że trzy wybrane czujniki pozwalają określić pozycję węzła P nawet, jeśli zarówno pozycje jak i odległości obarczone są błędem.



Rys. 4.(Fig.6. Base stations (BS) placed close to themselves (a) or in three corners of the field (b), Methods of sensors...).

Aby ocenić proponowane rozwiązanie, przeprowadzono symulację przy pomocy pakietu Matlab. Założono, że na obszarze o wymiarach 1000x1000 (jednostek) rozmieszczono losowo 250 węzłów. Każdy sensor może komunikować się każdym innym sensorem, jeśli odległość między nimi jest mniejsza niż  $R$ . Na początku założono, że są znane pozycje trzech sensorów i zostały one umieszczone w narożniku obszaru. Ponadto, znane są odległości  $d_{ij}$  oszacowane przez węzły w taki sposób, że:

$$d_{ij}^* = \begin{cases} d_{ij} \cdot (1 + A_{ij} \cdot k) & \text{when } d_{ij} \leq R \\ -1 & \text{when } d_{ij} > R \end{cases} \quad (17)$$

We wzorze (17)  $d_{ij}$  jest rzeczywistą, nieznaną odległością pomiędzy węzłem  $i$  a  $j$ .

$A$  jest liczbą losową z przedziału  $(-1,1)$  związaną z różnymi dokładnościami estymacji odległości. Parametrem  $k$  zmienia się od 0.005 (co oznacza, że odległości zostały oszacowane bardzo dokładnie) do 0.1 (5-10% dokładność szacowania odległości jest uważana za możliwą do uzyskania) [T.Y. Chen, C.C. Chiu, T.C. Tu, *Mixing and Combining with AOA and TOA for Enhanced Accuracy of Mobile Location*, IEE, Michael Faraday House, Stevenage, 2003 ; I. Jami, M. Ali, R.F. Ormondroyd, *Comparison of methods of locating and tracking cellular mobiles*, IEE, Savoy Place, London 1999; N. Patawari, A.O. Hero III, *Location Estimation Accuracy in Wireless Sensor Networks*, IEEE 2002]. Lokalizacja wszystkich sensorów będzie wyznaczana przy wykorzystaniu odległości  $d_{ij}$  i proponowanego algorytmu. W każdej iteracji wyznaczamy sensor o nieznanym położeniu  $i$  z największą wielkością niezerowych elementów  $d_{ij}$  gdzie  $j$  jest sensorem o znanym położeniu. Wybieramy trzy znane węzły  $j_A, j_B, j_C$  spełniające warunki dla  $\varepsilon$  i  $\gamma$ . Następnie wyznaczamy węzeł  $i$ , który będzie wykorzystany w następnej iteracji do znalezienia innego sensora o nieznanym położeniu. Po wyznaczeniu pozycji wszystkich sensorów, obliczamy błąd średni położenia wszystkich sensorów jako:

$$AR = \frac{\sum_{i=1}^{250} \sqrt{(x_i - x_i^*)^2 + (y_i - y_i^*)^2}}{250} \quad (18)$$

Gdzie  $(x_i, y_i)$  jest rzeczywistym położeniem sensora a  $(x_i^*, y_i^*)$  jest położeniem szacowanym. Tabela 1 pokazuje średnie wyniki 50 symulacji dla różnych wartości parametrów.

Tabela 1. (Table 1. Simulations results for different parameters, Methods of sensors...).

Parameters:	$R = 500$ $\varepsilon = 75$ $\gamma = 15^\circ$	$R = 500$ $\varepsilon = 50$ $\gamma = 15^\circ$	$R = 500$ $\varepsilon = 50$ $\gamma = 10^\circ$	$R = 250$ $\varepsilon = 50$ $\gamma = 10^\circ$
$k = 0.005$	10.049	10.343	11.076	8.304
$k = 0.01$	19.286	20.838	23.899	18.471
$k = 0.02$	34.519	34.787	44.499	33.390
$k = 0.03$	56.697	65.426	64.286	53.397
$k = 0.05$	111.998	112.713	112.009	106.443

W Tabeli 1. przedstawiono zależność między średnim błędem AR lokalizacji czujników i błędem szacowania odległości (parametr  $k$ ) dla różnych wielkości parametrów  $R, \varepsilon$  i  $\gamma$ . Parametry te są związane ze sposobem wyboru trzech czujników służących do znalezienia położenia innego czujnika. Można zauważyć, że dla pewnych  $k$ , parametry  $R, \varepsilon$  i  $\gamma$  wpływają z pewnością na średni błąd. Porównano prezentowaną metodę lokalizacji sensorów w WSN z typowym podejściem, w którym trzy stacje bazowe (BS) były rozmieszczane w narożniku obszaru i mierzone były odległości do każdego wierzchołka. Rozpatrywano dwa przypadki. W pierwszym, BS były umieszczane blisko siebie (Rys.4. - Fig. 6a). W drugim były rozmieszczane w trzech różnych wierzchołkach obszaru (Rys.4. - Fig. 6b). W omawianej metodzie wartości parametrów były równe odpowiednio:  $R = 250, \varepsilon = 50$  and  $\gamma = 10^\circ$ . Rezultaty symulacji świadczą, że umieszczenie BS w narożnikach obszaru umożliwia znalezienie położenia czujników przy znacznie zmniejszonym błędzie oszacowania położenia. Można również stwierdzić, że należy unikać sytuacji, gdy węzły BS, stosowane do lokalizacji innego czujnika, są blisko siebie. Zauważmy również, że wyniki uzyskane zgodnie z przedstawioną metodą lokalizacji czujnika w WSN są gorsze niż przy użyciu stacji bazowych w trzech różnych narożnikach obszaru oraz znacznie lepsze, gdy stacje bazowe znajdują się w pobliżu jednego z narożników. Stąd związek między średnim błędem lokalizacji (AR) i średnim błędem estymacji odległości ( $k$ ) dla metod wykorzystujących stacje bazowe jest liniowy. Z powodu propagacji błędu prezentowanej metody wartość AR rośnie szybciej, wraz ze wzrostem parametru  $k$ .

Efektywność przedstawionej metody zależy od parametrów  $R$ ,  $\varepsilon$  i  $\gamma$ . Na podstawie wyników symulacji można stwierdzić, że w celu zminimalizowania błędu należy zwiększyć wartości  $\varepsilon$  i  $\gamma$ . Jeśli do znalezienia lokalizacji innego używane są trzy czujniki, błąd wzrasta, gdy te trzy czujniki są blisko siebie lub leżą na prostej. Zwiększenie wartości  $\varepsilon$  i  $\gamma$  pozwala uniknąć zarówno jednej jak i drugiej sytuacji. Ponieważ zakłada się, że błąd szacowania odległości rośnie wraz odległością, należy zmniejszać  $R$ . Oczywiście, jeśli  $\varepsilon$  i  $\gamma$  zbyt rosną, może okazać się niemożliwym znalezienie trzech czujników spełniających te warunki. Najprostszym sposobem rozwiązania tego problemu byłoby wstępne zastrzeżenie warunków (ustalenie stosunkowo dużych wartości parametrów  $\varepsilon$  i  $\gamma$ ). Postępując w ten sposób modyfikujemy algorytm znajdowania trzech czujników.

Jeśli nie dysponuje się punktami A, B i C, to oznacza, że nie można znaleźć trzech węzłów spełniających wymagania ( $\varepsilon$  i  $\gamma$ ).

Wyznaczyć należy zatem nowe wielkości według poniższych wzorów:

$$\varepsilon = k_1 \cdot \varepsilon \quad (19)$$

$$\gamma = k_2 \cdot \gamma \quad (20)$$

Gdzie  $k_1, k_2 < 1$ .

Wykorzystując omówioną metodę, można znaleźć sensory A, B i C. Znając ich pozycję oraz odległość do węzła i, można wyznaczyć lokalizację sensora i. W celu oceny proponowanego algorytmu porównano wyniki symulacji z wynikami uzyskanymi przy rozmieszczeniu BS w trzech różnych narożnikach obszaru. Te BS były wykorzystywane do lokalizacji sensorów rozmieszczonych na tym obszarze.

Dobrano następujące parametry dla omawianego algorytmu:  $R = 250$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $\varepsilon = R \cdot 3/2 \approx 288.68$ ,  $k_1 = 0.95$ ,  $k_2 = 0.975$ .

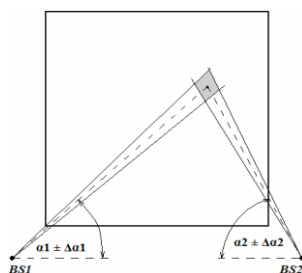
Parametr  $R$  został wzięty z poprzednich symulacji, a  $\varepsilon$  i  $\gamma$  zostały dobrane w taki sposób, że początkowo jedynie sensory, które tworzą trójkąt równoboczny wpisany w okrąg o promieniu  $R$  były wybierane do wyznaczenia innej pozycji węzła. Testowano różne wartości  $k_1$  i  $k_2$ , a najlepsze wyniki osiągnięto dla  $k_1 = 0.95$ ,  $k_2 = 0.975$ .

Porównano również wyniki uzyskane przy stosowaniu metody AoA. Lokalizacja sensorów została oszacowana przy wykorzystaniu dwóch BS umieszczonych w punktach (-100,-100) i (1100,-100) (Rys. 5). Do zlokalizowania węzłów w obszarze używano parametrów  $\alpha_{1,2}$  takich, że:

$$\alpha_{1,2}^* = \alpha_{1,2} \pm k \cdot A \quad (21)$$

Gdzie  $\alpha_{1,2}$  są kątami między nieznanym węzłem (Rys. 5), a BS 1 i 2 odpowiednio,

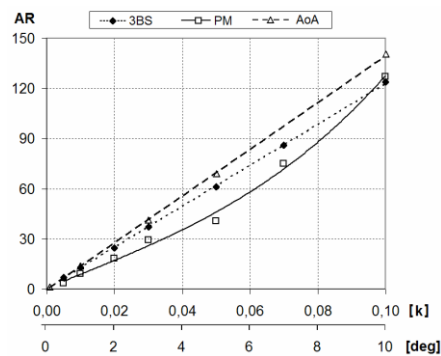
A jest liczbą losową z przedziału (-1,1), k jest parametrem z  $[0.1^\circ, 10^\circ]$ . Wartości do 10 stopni są typowe dla metody AoA [I. Jami, M. Ali, R.F. Ormondroyd, *Comparison of methods of locating and tracking cellular mobiles*, IEE, Savoy Place, London 1999; N. Patwari, A.O. Hero III, *Location Estimation Accuracy in Wireless Sensor Networks*, IEEE 2002; R. Peng, M. L. Sichitiu, *Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks*, Third Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, (Reston, VA), Sep. 2006.]



Rys. 5 (Fig.8. AoA method for sensors localization, Methods of sensors...).

Na Rys.6. pokazano wyniki symulacji (średni błąd znajdowania lokalizacji sensorów w funkcji k lub stopni). Tu 3BS reprezentuje metodę, w której trzy BS zostały rozmieszczone w trzech różnych narożnikach obszaru, PM przedstawia proponowaną metodę ( $R = 250$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $\varepsilon = R \cdot 3/2 \approx 288.68$ ,  $k_1 = 0.95$ ,  $k_2 = 0.95$ ). AoA są wynikami uzyskanymi przy stosowaniu opisanej uprzednio metody Algorithm. Angel of Arrival. Zgodnie z Rys.6. wyniki uzyskane proponowaną metodą obciążone są mniejszym średnim błędem w porównaniu do typowego wyniku (rozwiązania) wykorzystującego metodę 3BS lub metody AoA. Jak pokazano, proponowana metoda może współzawodniczyć z

typowymi metodami znajdowania położenia sensorów. Może być stosowana bez względu na wielkość obszaru. Nie jest też wymagany pełny dostęp do obszaru, co jest ważne nie tylko w zastosowaniach militarnych. W niektórych zastosowaniach nie ma konieczności wykorzystania BS, ponieważ konstelacja węzłów może być wyznaczona samodzielnie przez sensory. Średni błąd znajdowania pozycji sensorów jest zawsze mniejszy w porównaniu do typowych metod. Krytycznym punktem omawianej metody jest wybór trzech sensorów w celu znalezienia pozycji innego sensora.



Rys. 6. (Fig.9. Simulation results. 3BS – localization using base stations placed in three different corners of the field, PM – localization using presented method ( $R = 250$ ,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $\varepsilon = R \cdot 3 / 2 \cdot 288.68$ ,  $k_1 = 0.95$ ,  $k_2 = 0.95$ ), AoA – localization using AoA method, Methods of sensors...).

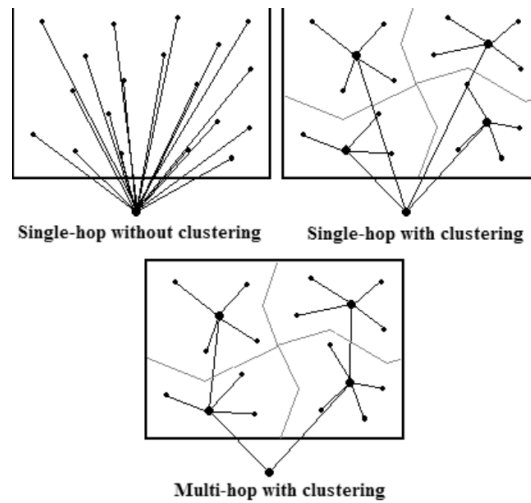
Przedmiotem badań były sposoby lokalizacji w 2D węzłów WSN bazując na trzech metodach: ToA, AoA oraz metody RSS. Opisano typowe rozwiązania, które wykorzystując stacje bazowe, znajduje lokalizację węzłów. Zaproponowano algorytm dedykowany sieci czujników bezprzewodowych losowo rozmieszczonych w pewnym obszarze. W proponowanym rozwiązaniu funkcję stacji bazowej przeniesiono do każdego czujnika. Pozycje węzłów są określane na podstawie odległości do trzech innych węzłów o znanych pozycjach (odległości można oszacować stosując dowolny możliwy sposób, na przykład RSS lub ToA). Wyniki symulacji pokazują sposób, w jaki parametry algorytmu wpływają na błędne szacowania położenia węzła. Zoptymalizowano algorytm wyboru trzech sensorów, które są używane do zlokalizowania innych czujników. Zaproponowano też zminimalizowanie błędu szacowania lokalizacji węzłów. Efektywność proponowanego algorytmu jest konkurencyjna w porównaniu do metod wykorzystujących rozmieszczenie stacji BS w narożnikach obszaru lub AoA.

Z kolei symulacja protokołów w WSN jest przedmiotem pracy:

Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał P, Rozenblit Jerzy: *An improvement of energy aware routing in wireless sensors network*. W: *International Mediterranean Modelling Multiconference 2006. [2nd European Modeling and Simulation Symposium. EMSS 2006], Barcelona, Spain, October 4-6, 2006 / Ed. by A. G. Bruzzone [at al], Piersa : LogiSim, s. 599-604.*

Głównym celem WSN jest zwiększenie czasu działania sieci (network lifetime). Istotną w tym rolę odgrywa klasteryzacja protokołów w tworzeniu komunikacji między głównymi węzłami (Cluster Heads - CHs). Skuteczne algorytmy routingu zwiększają żywotność sieci, poprawiają jej bezpieczeństwo i odporność na błędy sensorów. Sensory mogą być wykorzystywane w nieprzyjnym środowisku, czyli np. na polach bitew, rozległych terenach leśnych, obszarach zagrożonych pożarem lub strefach bezpieczeństwa. W tym środowisku nie jest możliwe uzupełnianie energii czujników. Jest to głównym powodem, dla którego zużycie energii odgrywa tak ważną rolę dla czasu działania sieci. Żywotność sieci może być określona jako czas, który upływa do śmierci pierwszego (lub ostatniego) węzła. Zaproponowano wiele protokołów zwiększających żywotność sieci poprzez zmniejszenie, zużycie mocy. Najnowsze badania WSN wskazały, że klasteryzacja (clustering) jest bardzo skuteczną metodą dla sieci sensorów, w której każdy czujnik musi zdecydować o tym, że zostaje CH (Cluster Head) lub nie. Jeśli zostaje czujnikiem, musi zdecydować o swojej przynależności do konkretnego klastra. CHs są odpowiedzialne za komunikację w ramach klastra jak i również za komunikację między innymi CHs. Ponieważ wielkość obszaru sieci jest zazwyczaj większa niż zasięg czujnika, jest konieczne utworzenie struktury multi-hop do komunikacji pomiędzy CHs (Rys. 1). Taka struktura ma niewielki wpływ na żywotność sieci. Proponowane algorytmy routingu skutecznie rozdzielają koszt czujnika będącego CH, pomiędzy wiele czujników klastra. W sieci CHs są odpowiedzialne zarówno za komunikację między klastrami i jak wewnątrz klastra. Zatem ich wybór musi uwzględniać poziom energii każdego czujnika.

Zapewniony musi być wybór węzłów o największej mocy. Ze względu na fakt, że klasteryzacja jest przeprowadzana na zbiorze niezależnych czujników, decyzja jest oparta tylko przy użyciu lokalnych informacji. Informacja o zakończonym procesie klasteryzacji (Rys. 2) musi być dostarczona do każdego czujnika.

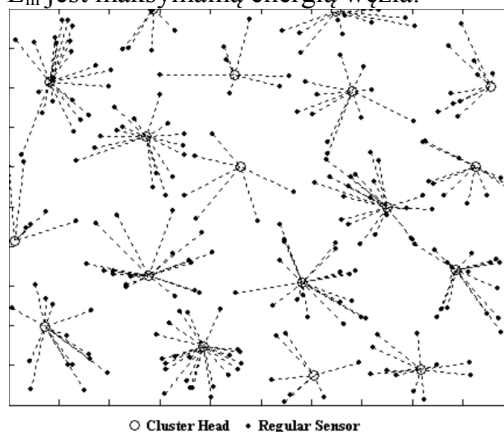


Rys<sup>8</sup>. 1 (Figure 1: Different network structures, An improvement of energy...).

W celu spełnienia tych warunków można zaproponować kilka protokołów. Opracowane rozwiązanie oparte jest na protokole HEED (Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering) opisano w pracy [Younis, O. and S.Fahmy, "HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks", *IEEE Transactions On Mobile Computing*, VOL. 3, NO. 4, Oct-Dec 2004]. Protokół kończył się po ustalonej liczbie iteracji i zapewnia dobrą dystrybucję CH. Podobnie jak w wiele protokołów klasteryzacji, wybór CH jest oparty na analizie energii węzłów. Czujniki o wysokiej energii są uprzywilejowane, ale nie ma gwarancji, że węzły o największej mocy będą faktycznie wybrane. Dla czujnika k obliczenie prawdopodobieństwa jego wyboru jako CH zaczyna się w następujący sposób:

$$CH_{prob} = \text{Max} \left( C_{prob} \cdot \frac{E_c}{E_m}, P_{\min} \right) \quad (1)$$

gdzie  $E_c$  jest energią węzła,  $E_m$  jest maksymalną energią węzła.



Rys.2 (Figure 2: Network structure after clustering, An improvement of energy...).

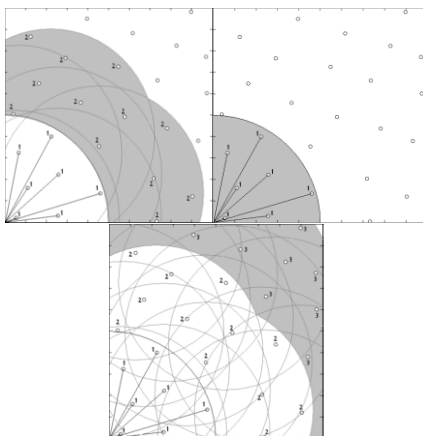
<sup>8</sup> W rozdziale tym, tak samo jak i przy omawianiu poprzedniej pracy, rysunki i tabele opisywane są według reguły: najpierw kolejny numer rysunku, dalej numer rysunku i jego opis z omawianej pracy zgodnie z listą prac (1 do 4) w p. 3.2.3 C. Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał P, Rozenbliit Jerzy: *An improvement of energy aware routing in wireless sensors network*. W: *International Mediterranean Modelling Multiconference 2006*. [2nd European Modeling and Simulation Symposium. EMSS 2006], Barcelona, Spain, October 4-6, 2006 / Ed. by A. G. Bruzzone [at al], PIERA : LogiSim, s. 599-604. W nawiasie podany jest skrót tytułu tej pracy.

Dla  $CH_{prob}$  przyjęto wartość 0,05 (nie ma to bezpośredniego wpływu na wynik końcowy). Wartość  $p_{min}$  jest określona jako 0,009 i to gwarantuje, że algorytm zakończy iteracje po ustalonej liczbie iteracji  $N_{iter}$ . Po każdej iteracji i dla każdego nieokreślonego węzła, który nie jest ani CH ani regularnym czujnikiem, losuje się liczbę  $A$  z przedziału  $[0, 1]$ . Jeżeli  $A$  jest mniejsza niż  $CH_{prob}$ , węzeł staje się CH i wysyła wiadomość CHMsg (ID). Jeśli czujnik nie jest CH, to oczekuje na wiadomość CHMsg (ID) (do czasu  $T_w$ ). Jeśli węzeł nie zna jeszcze CH, to następnie łączy się z pierwszym słyszalnym CH. Jeśli jednak ma już wyznaczony CH, to następnie łączy się z najbliższym węzłem (w sensie kosztów komunikacji). Jeśli po upływie czasu  $T_w$ , czujnik nie został wybrany jako CH i nie jest przyłączony do innego z klastrów, podwaja swoją  $CH_{prob}$  i uruchamia się kolejna iteracja. Jak wykazano [p.wzmiankowany już uprzednio W. Junis i Fahmy] działanie takiego algorytmu kończy się po ustalonej liczbie iteracji  $N_{iter}$ . W najgorszym przypadku energia każdego węzła jest bliska zeru, więc  $CH_{prob}$  jest ustawione na  $p_{min}$ . Grupowanie na pewno skończy się, gdy  $CH_{prob} = 1$ . Ponieważ wielkość  $CH_{prob}$  jest podwojona w każdej iteracji, możemy znaleźć  $N_{iter}$  w następujący sposób:

$$N_{iter} \left\lceil \log_2 \frac{1}{p_{min}} \right\rceil + 1 \quad (2)$$

Jak łatwo zauważyć, liczba iteracji nie zależy od liczby sensorów. Każdy sensor otrzymuje informację, kiedy proces klasteryzacji kończy się i kiedy zaczyna się następna faza. Po upływie czasu  $T_{cluster} = T_w N_{iter}$  proces klasteryzacji jest zakończony.

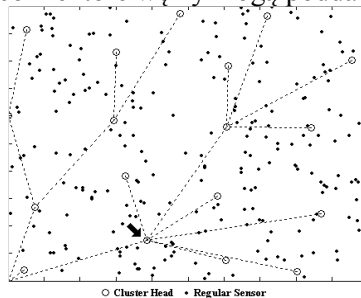
Jak wspomniano wcześniej, zakłada się, że rozmiar sieci jest większy niż zasięg poszczególnych czujników. I to przede wszystkim dlatego niezbędna jest budowa struktury multi-hop, która łączy wszystkie CH z BS. Procedura rozpoczyna się od transmisji wiadomości: "Mój Stan: 0-kroków do BS" wysłanego z BS. Każdy węzeł, który odbierze wiadomość: "Mój stan: X-kroków do BS" ustanawia swój stan na: "(X + 1) kroków do BS" i wysyła wiadomość: "Mój Stan: (X + 1) kroków do BS". Na Rys. 3 wskazano, w jaki sposób różne czujniki określają swój stan. Kiedy węzeł o stanie X + 1 może komunikować się z więcej niż jednym węzłem o statusie X, musi dokonać wyboru jednego z nich.



Rys 3. (3Figure 3: Building multi-hop structure in cluster heads layer, An improvement of energy...).

Jest to kluczowy problem w obliczaniu tras, przy wyborze ścieżek komunikacyjnych. Jeden z najbardziej popularnych algorytmów wykorzystuje szacowanie odległości między sąsiednimi węzłami (sąsiadami). Ponieważ wszystkie wiadomości: "Mój stan" są wysyłane z tą samą mocą, stąd poprzez analizę odebranej mocy w węzle, można oszacować odległość do sąsiada. Przy decyzji wyboru między dwoma lub większą liczbą węzłów, wybierany będzie najbliższy, bo to minimalizuje zużycie energii. Węzeł  $m$ , które nie jest jeszcze przyporządkowany, oczekuje na wiadomość ("Mój Stan: X kroków-doBS "). Jeśli wiadomość ta jest odebrana po raz pierwszy, czujnik  $m$  określa swój stan, jako "X + 1-kroków do-BS" i wysyła wiadomość ("Mój stan: X + 1-kroków-doBS"). Pamiętana jest również odległość do następnego węzła. Jeśli będzie odebrana inna wiadomość: ("Mój stan: X-kroków-do-BS"),

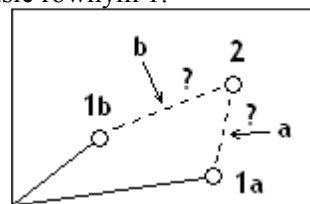
węzeł m musi zdecydować, który z węzłów o stanie X jest bliższy. Ostatecznie, najbliższy węzeł będzie kolejnym węzłem dla czujnika m. Jak wykazano, algorytm (który będzie nazywamy tutaj Algorytmem 1) wykorzystuje jedynie odległości do kolejnych CH, a w każdym węźle następuje próba minimalizacji zużycie energii. Jednak algorytm ten generuje również efekty uboczne, co nazywane jest "zjawiskiem popularnych węzłów (Rys. 4), przez co niektóre węzły mogą poddać "zbyt dużym ciśnieniom".



Rys.4 (Figure 5: Connections in cluster head layer with sink at (0,0). 'Popular' cluster head is pointed out, An improvement of energy...).

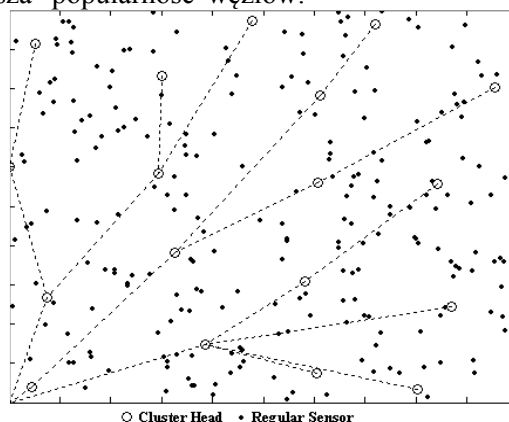
W rezultacie, dość często przeprowadza się re-klastering (re-clustering.). Ma to wpływ zarówno na żywotność sieci jak i na jej bezpieczeństwo. Jeśli to możliwe, należy unikać takiej sytuacji, w której zbyt wiele czujników należy tylko do jednego CH.

Z kolei Algorytm 2 ma na celu złagodzenie opisanych problemów i problemów, związanych ze znalezieniem węzła używanego do komunikacji z BS. Zwraca się uwagę nie tylko na koszty komunikacji z sąsiadami, ale także globalne koszty komunikacji z BS. Na Rys.5 pokazano dwie możliwe opcje: trasa a jest wyznaczona zgodnie z Algorytmem 1 - węzeł o statusie równym 2 znajduje węzeł "1a", jako najbliższy czujnikowi o statusie równym 1.



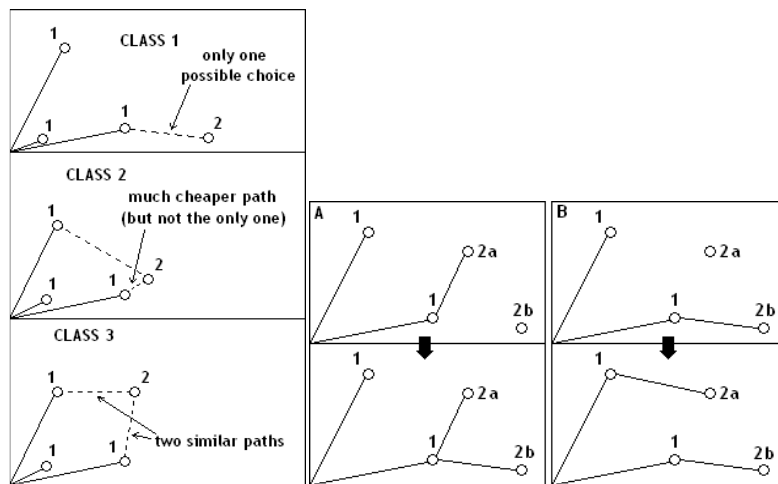
Rys.5.(Figure 6. Possible choices of following node), An improvement of energy )..

Czujnik ten staje się jej kolejnym węzłem. Trasa b zostanie wybrana zgodnie z Algorytmem 2. Węzeł o statusie = 2 oznacza, że czujnik "1a" jest bliżej niż "1b", ale to węzeł "1b" zapewnia tańsze połączenie z BS. Dlatego zostanie wybrana trasa b zgodnie z Algorytmem 2. Korzystanie z Algorytmu 2 wymaga większej ilości energii niż Algorytmu 1. W Algorytmie 1 wiadomość ("Mój stan: mój koszt do BS") należy wysłać N razy, gdzie N oznacza liczbę CH. W algorytmie 2 wiadomość ("Mój stan: mój koszt do CH") jest wysyłana za każdym razem, gdy czujnik zmienia kolejny węzeł. Jak pokazano na Rys. 6 Algorytm 2 faktycznie zmniejsza "popularność" węzłów.



Rys.6. (Figure.8 Connections in the cluster head layer with sink at (0,0). The node's 'popularity' is reduced, An improvement of energy...)

W wyniku stosowania Algorytmu 2 następuje redukcja 'popularności' węzła, dzięki czemu zwiększa się żywotność (lifetime) sieci oraz sieć staje się bardziej bezpieczna i niezawodna. Zaproponowano modyfikację zmniejszającą jeszcze bardziej „popularność” węzła. Wykazano, że Algorytm 2 daje lepsze wyniki niż Algorytm 1, jednak w wielu konstelacjach CH poprawa jest nadal niezadowalająca. Ponieważ w kolejnym procesie wyboru CH bierze się pod uwagę koszty komunikacji, nie ma gwarancji, że nie wystąpi efekt "popularnych" węzłów. W celu zapewnienia współdzielenia kosztów komunikacji na wszystkie CHs, należy włączyć obciążenia bieżącej ścieżki w obliczanie kosztów ścieżki. Każdy CH o nieznanym stanie oczekuje na wiadomość (k - stan: X-kroków do BS, koszt k, k obciążenie). Po upływie czasu  $T_1$  podejmuje decyzję o przynależności: Klasa 1, 2 lub 3 (Rys.7). Węzły Klasy 1 mogą komunikować się tylko z jednym czujnikiem o stanie: "X-kroków do BS" (do węzłów tych dociera tylko jedną wiadomość). Węzły Klasy 2 i 3 to węzły, które otrzymały więcej niż jedną wiadomość. Muszą więc zdecydować, który z czujników (ścieżkę) należy wybrać. Węzły Klasy 3 to węzły, które mają co najmniej dwie podobne ścieżki do wyboru. Klasa 2 to węzły, które mają więcej niż jedną możliwość wyboru ścieżki, ale jedna z nich jest znacznie lepszym rozwiązaniem (koszt jest znacznie mniejszy) niż inne. Procedura ta jest podzielona na trzy cykle. Po pierwszym cyklu wszystkie (X + 1) CHs Klasy 1 znalazły ścieżki. Po cyklach drugim i trzecim wszystkie (X + 1) węzły Klas 2 i 3 wybrały swój kolejny węzeł. Wybór polega na minimalizacji kosztów ścieżki (jak w Algorytmie 2) i obciążeniach X węzłów. Każdy z X węzłów powtarza wiadomość (k - "X-kroków do BS", "koszt", "obciążenie") po każdym cyklu. Na Rys.8 pokazano konieczność podziału węzłów na trzy klasy.



Rys.7 (Figure 10: Three classes classes.

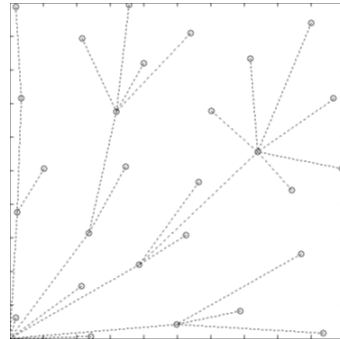
Rys. 8 (Figure 11: Choosing paths with and without of cluster heads., , An improvement of energy...).

Załóżmy, że węzeł 2a zdecydowałby pierwszy o wyborze ścieżki (sytuacja A). Wybrałby węzeł 1b, gdyż jest to najkrótsza ścieżka. Węzeł 2b wybrałby również czujnik 1b, ponieważ jest to tylko jedna możliwa ścieżka. W sytuacji B można zauważyć, co się dzieje, kiedy węzeł 2b należy do klasy 1 a węzeł 2a do klasy 3. Początkowo, węzeł 2b znajduje ścieżkę, następnie w kolejnym cyklu węzeł 2a wybiera czujnika 1a. Ścieżka ta nie jest tańsza, ale już wybrany węzeł 1b posiada obciążenie = 1. Przedstawiony Algorytm 3 jest droższy niż Algorytm 2, jednak bardziej redukuje "popularność węzłów”.

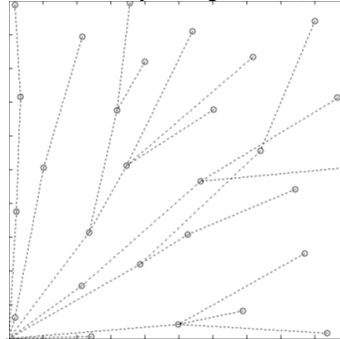
W przeprowadzonych symulacjach przyjęto, że 250 węzłów zostało losowo rozmieszczone na obszarze w 1000 x 1000. (jednostek). Definiuje się odległość wyrażoną w kategoriach kosztów energetycznych. Węzeł A znajduje się dwukrotnie bliżej węzła C niż węzeł B, oznacza to, że koszt komunikacji między węzłem A i węzłem C jest dwukrotnie mniejszy niż koszt między węzłami B i C. Definicja ta wydaje się być dość naturalną, jeśli uświadomimy sobie, że czujniki nie znają swojego położenia geograficznego. Sąsiadów znajdują tylko na podstawie wielkości mocy odbieranego sygnału. Każdy węzeł ma określone różny poziomy mocy transmisji. Maksymalna moc nadajnika jest tak ustawiona, aby zapewniono komunikację czujników w zasięgu 500 (jednostek). Ustawia się również maksymalną moc nadajnika w ramach klastra. Parametr ten określa maksymalny promień klastra, jako 150 (jednostek). Zakłada się, że początkowo akumulatory wszystkich czujników są całkowicie naładowane. Ponadto, aby porównać proponowane algorytmy należy najpierw wybierać CHs, a następnie wybierać klastry. Po drugie, CHs znajdują ścieżki do BS i wreszcie każdy węzeł wysyła jedną



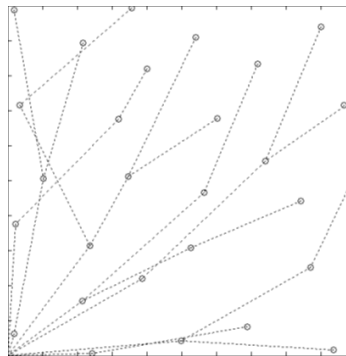
wiadomość do BS. Po tej operacji sprawdzona zostaje średnią energia CH oraz poziom energii najsłabszego CH. Dodatkowo sprawdza się, ile CHs znajduje się na najbardziej obciążonej ścieżce. Wyniki obliczenia tras ilustrują Rys. 9-11 przy użyciu Algorytmów 1, 2 i 3. Na Rys.9 pokazany jest jeden przeciążony CH przy użyciu Algorytmu 1. Ponadto 9 CHs (ogólna liczba CHs to 28) korzysta z tego samego czujnika do komunikacji z BS. To przeciążenie zmniejsza się, gdy używamy Algorytmu 2 Rys.10.



Rys.9 Figure 12: Routes in cluster head layer (Algorithm 1), An improvement of energy...



Rys.10 (Figure 13: Routes in cluster head layer (Algorithm 2), An improvement of energy...)



Rys. 11 (Figure 14: Routes in cluster head layer (Algorithm 3), An improvement of energy...)

Obciążenie na najbardziej "popularnych" CHs zostało zmniejszone do 6. Następnie zostaje zmniejszone do 5 przy użyciu Algorytmie 3 (Rys.10). Średnie wyniki z 50 symulacji pokazano w Tabeli 1. Liczba CHs równa jest liczbie wszystkich CHs. To zależy od klastrów i jest taka sama dla wszystkich trzech algorytmów. Maksymalne obciążenie jest liczbą CHs, które wykorzystują najbardziej przeciążone węzły. Średnia energia jest średnią energią węzła, gdzie 100% odpowiada całkowicie naładowanym akumulatorom. Wyniki uzyskano po klasteryzacji, obliczaniu tras i po wysłaniu wiadomości przez każdy z 250 węzłów BS.

Tabela 1. (Table 1. Average results of simulation), An improvement of energy...

Algorithm	Number of cluster heads	Maximum load	Average energy	Energy of the weakest CH
1	29,10	12,90	97,11%	76,01%
2	29,10	8,80	97,07%	84,64%
3	29,10	7,10	96,98%	86,84%

Jak pokazano wyżej, Algorytm 1 oferuje najwyższą wartość średniej energii, ale różnice są słabo zauważalne. Wyniki symulacji potwierdzają przypuszczenia, że Algorytm 1 generuje węzły "popularne". Widać także, że średnie obciążenie najbardziej przeciążonego węzła jest prawie 13, a jego zapas energii jest znacznie niższy niż średnia energia wszystkich czujników. Zgodnie z tym algorytmem, bezpieczeństwo sieci jest raczej niskie, gdyż można łatwo "wyłączyć" prawie połowę sieci przez zniszczenie tylko jednego czujnika. Jak pokazano, Algorytm 3 zapewnia znaczącą redukcję "popularności" węzła. Najbardziej przeciążony CH odpowiada tylko za 7 innych klastrów i ich komunikację z BS. Poziom energii najsłabszego węzła jest wciąż wysoki, ponieważ koszt komunikacji jest dzielony między wszystkie CHs.

Przedstawiono różne metody wyznaczania tras komunikacyjnych. Zaproponowano również algorytm znacznie zmniejszający zjawisko "popularności" węzłów. Zwiększa to czas, po którym proces klasteryzacji powinien być powtórnie wywołany. Re-clustering jest gwarancją, że koszty utworzenia CH będą dzielone pomiędzy wszystkie węzły. Dodatkowo, jeżeli żywotność sieci (network lifetime) będzie czasem, który upłynął do „śmierci” pierwszego węzła, to proponowany Algorytm zwiększa żywotność sieci poprzez zminimalizowanie poboru mocy przez najsłabszy czujnik. Zmniejszenie "popularności" węzłów sprawia, że również cała sieć czujników jest bardziej bezpieczna i odporna na błędy i uszkodzenia czujników. Wykorzystano symulacje, aby przetestować prezentowane algorytmy i wykazać ich właściwości. Prezentowane algorytmy mogą być zarówno weryfikowane i optymalizowane przed wykorzystaniem stosowane w realnej WSN.

### 3.3.3.3. Analiza metod modelowania zachowań relacyjnych elementów WSN

Bezprzewodowe sieci czujników/sensorów (WSN), mogą być traktowane, jako istotne elementy wspólnej infrastruktury z dzielonymi zasobami. Dzięki możliwości wielokanałowej, różnorodnej obsługi możliwe jest wykonywanie współbieżnie aplikacji uruchamianych przez różnych użytkowników w rozproszonym środowisku. Jest to dużym kontrastem do tradycyjnych systemów, gdzie dedykowane fizycznie i logicznie sensory podłączone są na stałe do infrastruktury komunikacyjnej i komputerowej, obsługując bardzo specyficzne aplikacje dedykowane do przetwarzania informacji. Bezprzewodowe sieci sensorowe składają się z wielu węzłów rozmieszczonych w obszarze, który znacznie przekracza zasięg komunikacji pojedynczego czujnika. Routing wiadomości jest jednym z najbardziej ważnych kwestii w takich sieciach. Wynika to głównie z powodu dużej liczby węzłów, różnorodności możliwych ścieżek komunikacyjnych, ograniczeń źródeł zasilania i zmienności (w czasie i przestrzeni) warunków środowiska obszaru obsługiwanego przez WSN. Współdzielony kanał komunikacyjny i ograniczone zasięgi komunikacyjne wymagają, aby węzły WSN współpracowały i koordynowały swoje działania, w trakcie transmisji wiadomości z węzłów do stacji bazowej (BS). Jest dobrze znana metoda Kartezjusza, polegająca na rozwiązywaniu dużych i złożonych problemów, poprzez dzielenie na mniejsze i zazwyczaj prostsze zadania. Najważniejszym elementem tego podejścia jest sposób podziału problemu na podproblemy, które można rozwiązać efektywnie. Istotnym jest, aby możliwe było znalezienie rozwiązania problemu pierwotnego. Rozproszony system, jakim jest WSN, uważany jest tradycyjnie za zbiór przestrzennie rozmieszczonych komunikujących się i koordynujących swoje działania węzłów. Węzły informowane są o swoim statusie za pomocą specjalnych wiadomości wysyłanych za pośrednictwem kanału komunikacyjnego Dollimore et al. [Dollimore, J., Kindberg, T. & Coulouris, G.. *Distributed Systems: Concepts and Design*, Addison-Wesley, 2005]. Zakłada się, że system ten jest zazwyczaj odizolowany od świata zewnętrznego, nawet, jeśli dokonuje pomiaru jego parametrów i rejestruje komunikaty o stanie innych węzłów, to nie jest jeszcze narażony na wpływ warunków środowiskowych i ich zmian. System taki będzie systemem obsługującym bardzo specyficzne i dedykowane aplikacje przetwarzania danych.

Obserwacji podlega system składający się z niezależnych elementów, które dostosowują swoje działania w zależności od aktualnej sytuacji w swoim sąsiedztwie. A w WSN w celu osiągnięcia celów określonych globalnie. Otoczenie każdego węzła składa się z elementów dwójakiego rodzaju:

- sąsiedztwo - zbiór elementów WSN (czyli węzłów), które znajdują się w okolicy węzła;
- środowisko - zbiór elementów, które są w otoczeniu węzła, mają wpływ na jego zachowania, ale nie są elementami WSN.

Powyższe podejście pozwala opisać każdy system sensorów, jako system otwarty, w którym aktywność komunikacja dostosowuje się do bodźców, które pochodzą zarówno od elementów systemu

jak również od środowiska. Umożliwia to systemowi reakcję w trudnych i niespodziewalnych sytuacjach, co może być korzystne w wielu zdarzeniach. Analizując WSN ważne jest uchwycenie czterech powiązanych własności:

- niezależność elementów WSN,
- współpraca elementów,
- komunikacja pomiędzy elementami WSN,
- współdziałanie elementów z otoczeniem.

Koncentrowano się na komunikacji w systemie rozproszonym, takim jak WSN. Głównym celem komunikacji w WSNs jest retransmisja wiadomości i dostarczenie jej do stacji bazowej (BS). Zainteresowanie rozproszonymi WSNs wynika nie tylko ze względu na rozkład przestrzenny węzłów sieci, ale również ze względu na fakt, że decyzje dotyczące routingu wiadomości i ścieżek komunikacji są podejmowane w sposób rozproszony, jako efekt współpracy pomiędzy węzłami.

### 3.3.3.3.1. Relacyjny model komunikacji w WSN

Badania aktywności WSN mogą być oparte na relacyjnym modelu współpracy między węzłami sieci [Nikodem, J. *Relational approach towards feasibility performance for routing algorithms in wireless sensor network, Dependability of Computer Systems, International Conference on pp. 176–183.2009*]. Model relacyjny oddaje zależności (relacje) między węzłami sieci i określa działania, które węzły mogą podjąć w różnych sytuacjach. Podejmowane działania są działaniami indywidualnymi każdego węzła, więc model relacyjny może być używany do opisu współpracujących w sieci niezależnych elementów w celu osiągnięcia określonych globalnie celów. Ponieważ model relacyjny odzwierciedla rzeczywisty charakter WSN, w związku z tym zawiera wszystkie poprzednie propozycje organizacji komunikacji i routingu sieci. Ponadto, pozwala na budowę nowych algorytmów, które umożliwią realizację globalnie zdefiniowanych celów poprzez lokalne działania w każdym węzle sieci

Aktywność komunikacyjna w WSN można opisać za pomocą trzech relacji binarnych określonych na zbiorze działań *Act*. Zbiór działań zawiera wszystkie działania, które nie tylko mogą być wykonywane przez każdy węzeł sieci indywidualnie, ale w odniesieniu do innych węzłów i otoczenia (czyli sytuacji w sąsiedztwie). Zdolność do wykonywania konkretnych działań zależy od stanu węzła (np. ustanowienie działań sieci, zarządzanie siecią i praca sieci). Jego przeprowadzenie może być przyczyną zmiany stanu węzła. Dlatego wszystkie działania, które mogą być podjęte przez węzły WSN są określone przez iloczyn kartezjański zbioru węzłów (*Nodes*) i zbioru wszystkich możliwych stanów (*States*) :

$$\text{Act} : \text{Nodes} \times \text{States} \rightarrow \text{States} \quad (1)$$

Pomiar parametrów środowiskowych, agregacja danych, wysyłanie wiadomości do pojedynczego (lub grupy) węzła i odbieranie wiadomości to przykłady działań, które mogą być podjęte przez węzły. Ponieważ węzły są autonomiczne, więc każdy węzeł może wykonywać czynności, niezależnie od innych węzłów. Niewątpliwie, jest to korzystne, ponieważ inne węzły w WSN mogą wykonywać różne działania (*actions*) równocześnie. Z drugiej strony, liczba działań staje się istotna tylko wtedy, gdy mogą współpracować dwa lub więcej węzłów. W takiej sytuacji współpraca wymaga, aby węzły wykonywały działania, które są w relacji. Formalnie zapisuje się to w następujący sposób:

$$a_i^{(1)} R a_j^{(2)} \quad (2)$$

Gdzie  $a_i^{(1)}$  i  $a_j^{(2)} \in \text{Act}$  oraz  $a_i^{(k)}$  oznacza *i-te* działanie wykonane przez *k-ty* węzeł.

Zależność (2) powinna być rozumiana, jako działanie  $a_i^{(1)}$  w relacji z  $a_j^{(2)}$ . Relacje są używane do określenia czynności, które są powiązane ze sobą i są wykonane wspólnie (ale niekoniecznie w tym samym momencie czasu). Lub też nie są wykonane wspólnie. Ponieważ węzły potencjalnie wykonują ogromną liczbę działań, które mogą być częścią różnych relacji, więc relacje mają swoje nazwy i symbole. Dlatego główną uwagę koncentruje się na komunikacji, w związku z tym, szczególna uwaga będzie zwrócona na relacjach powiązanych z komunikacją oraz na uproszczeniach notacji. Wysyłanie i odbieranie wiadomości będzie oznaczone przez  $x$ , gdzie  $x$  oznacza identyfikator węzła (ID), który może być zarówno nadawcą jak i odbiorcą pakietu wiadomości. To czy węzeł  $x$  przesyła lub odbiera wiadomość wynika z kontekstu lub zostanie wyjaśnione w tekście. Do opisu rozmaitych możliwych zależności między różnymi elementami świata rzeczywistych WSN wystarczy określić trzy podstawowe relacje [Jaron, J. *Systemic prolegomena to theoretical cybernetics, Technical report, Inst. of Techn.*

Cybernetics1978; Nikodem, J. *Autonomy and cooperation as factors of dependability in wireless sensor network, Dependability of Computer Systems, International Conference on pp. 406–413.2008*]:

- podporządkowanie –  $\pi$ ;
- tolerancja -  $\mathcal{G}$ ;
- kolizja  $\chi$ .

Gdy rozpatruje się wysyłanie i odbieranie wiadomości, wtedy podporządkowanie

$$x_R \pi y_S \quad (3)$$

oznacza, że węzeł  $y$  odbiera dane, gdy węzeł  $x$  je wysyła. Podporządkowanie jest przechodnie, co oznacza, że jeśli  $x$  jest podporządkowane  $y$ , a  $z$  jest podporządkowany  $y$ , to  $z$  jest również podporządkowane  $x$ :

$$x_R \pi y_S \text{ and } z_R \pi y_S \Rightarrow z_R \pi x_S \quad (4)$$

Podporządkowanie jest antysymetryczne co oznacza, że jeśli  $x$  jest podporządkowane  $y$ , to  $y$  nie jest podporządkowana do  $x$ :

$$x_R \pi y_S \Rightarrow \neg(y_R \pi x_S) \quad (5)$$

Można zdefiniować zbiór  $\Pi$  par węzłów WSN, które są w relacji podporządkowania. Ten zbiór składa się z uporządkowanych par węzłów takich, że

$$\Pi = \{ \langle x, y \rangle \mid x_R, y_S \in Act \text{ and } x_R \pi y_S \} \quad (6)$$

Gdy występuje relacja tolerancji między węzłami  $x$  i  $y$

$$x_R \mathcal{G} y_S \quad (7)$$

Oznacza to, że  $x$  może odbierać wiadomości wysyłane przez węzeł  $y$ . Gdy  $x$  toleruje  $y$  to jest mniej prawdopodobne, że węzeł  $y$  wysyła wiadomości do  $x$  -  $y$  woli podporządkowane węzły. Niemniej jednak  $y$  może wysłać wiadomość do  $x$ . Jeśli to nastąpi to, to węzeł  $x$  otrzyma wiadomość i skieruje ją w kierunku BS. W przeciwieństwie do poprzedniej, relacja tolerancji jest symetryczna

$$x_R \mathcal{G} y_S \Rightarrow y_R \mathcal{G} x_S \quad (8)$$

ale nie jest przechodnia. Relacja subordynacji (podporządkowania) i tolerancji może być złożona - jeśli  $x$  jest podporządkowana do  $y$  i  $z$  toleruje  $x$ , to  $z$  również toleruje  $y$ :

$$x_R \pi y_S \text{ and } z_R \mathcal{G} x_S \Rightarrow z_R \pi y_S \quad (9)$$

Zbiór wszystkich węzłów, które tolerują się wzajemnie się to zbiór par  $\langle x, y \rangle$ , takich, że

$$\Theta = \{ \langle x, y \rangle \mid x_R, y_S \in Act \text{ and } x_R \mathcal{G} y_S \} \quad (10)$$

Jak wynika z definicji relacji  $\pi$ ,  $\mathcal{G}$  dla odpowiednich zbiorów podporządkowanych i tolerowanych węzłów ( $\Pi$ ,  $\Theta$ ) zachodzi

$$\Pi \subseteq \Theta \quad (11)$$

Ostatnią relacją, którą należy wziąć pod uwagę, to relacja kolizji. Dla transmisji danych i odbioru działań w WSN określa zbiór tych wszystkich sensorów, które nie wymieniają wiadomości między sobą. Relacja kolizji między węzłem  $x$  i  $y$  jest oznaczona jako:

$$x_R \chi y_S \quad (12)$$

Powyższa relacja występuje wtedy, gdy węzeł  $x$  nie odbiera żadnych komunikatów nadawanych przez węzeł  $y$ , zarówno nadawanych i skierowanych wiadomości z węzła  $y$  do węzła  $x$ . Dodatkowo, jeśli węzeł  $x$  jest w kolizji z węzłem  $y$  i węzeł  $z$  podporządkowany węzłowi  $y$ , to węzeł  $z$  jest również w kolizji z węzłem  $x$ . To może być wyrażone jako:

$$x_R \chi y_S \wedge z_R \pi y_S \Rightarrow z_R \chi x_S \quad (13)$$

Relacje tolerancji i kolizji wzajemnie wykluczają się. Zatem tylko te wierzchołki WSN, które nie są w relacji tolerancji mogą pozostać w relacji kolizji. Tak więc, jeśli oznaczymy zbiór węzłów, które pozostaje w relacji kolizji, jako:

$$K = \{ \langle x, y \rangle \mid x_R, y_S \in Act \wedge x_R \chi y_S \} \quad (14)$$

wówczas zbiory węzłów, które pozostają w relacji tolerancji i kolizji spełniać będą następujące kryterium

$$\Theta \cap K = \emptyset \quad (15)$$

Ponieważ zachodzi również  $\Pi \subseteq \Theta$ , więc wierzchołki, które są zarówno w relacji tolerancji i podporządkowania, nie mogą pozostać w relacji kolizji

$$\Pi \cap K = \emptyset \quad (16)$$

Badając komunikację multi-hop w sieciach sensorowych, należy uwzględnić specyficzny aspekt WSN, jak współpraca węzła i czujnika. Ze względu na ograniczony zasięg komunikacji, większość węzłów w WSN nie jest zdolna do przesyłania danych bezpośrednio do stacji bazowej. Stąd węzły muszą wykorzystywać mechanizm retransmisji oferowanej przez inne węzły w ich otoczeniu. WSN są realnymi systemami rozproszonymi, w których węzły sensorowe charakteryzując się ograniczonymi zasobami komunikacyjnymi, współpracującymi między ze sobą w celu wspierania aktywność całej infrastruktury.

Zdarzenia i obiekty, które są w zakresie percepcji węzła należą do jego otoczenia (surroundings). W zbiorze, który nazwano otoczeniem, możemy wyróżnić dwa charakterystyczne podzbiory: sąsiedztwa (neighbourhood) i środowiska (environment). Biorąc pod uwagę fakt, że w WSN ważne są aspekty komunikacyjne, pojęcie sąsiedztwa jest szczególnie znaczące. Dlatego koncepcje te będą w dalszym ciągu rozwijane W publikacjach związanych z WSN, określenia sąsiedztwa są często stosowane, stając się zazwyczaj podstawowym określeniem wielu algorytmów routingu: [Braginsky, D. & Estrin, D. (2002). *Rumor routing algorithm for sensor networks, WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, ACM, New York, NY, USA, pp. 22–31*; Burmester, M., Le, T. V. & Yasinsac, A. (2007). *Adaptive gossip protocols: Managing security and redundancy in dense ad hoc networks, Ad Hoc Netw. 5(3): 313–323*; Manjeshwar, A. & Agrawal, D. P. (2001). *Teen: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, Parallel and Distributed Processing Symposium, International 3: 30189a.*; Younis, O. & Fahmy, S. (2004). *Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, IEEE Transactions on Mobile Computing 3: 366–379*]. Istotnym jest wyjaśnienie znaczenia wyrażenia  $Map(x, y)$ . Można je zdefiniować jako zbiór odwzorowań od zbioru  $X$  na zbiór  $Y$  (surjection). Zdefiniujemy  $Sub(X)$  jako rodzinę podzbiorów  $X$ , a sąsiedztwa, jako

$$N \in Map(Nodes, Sub(Nodes)) \quad (17)$$

Ponadto, jeżeli  $N(x)$  należy do sąsiedztwa węzła  $x$  i  $N(S)$  jest otoczeniem zbioru węzłów  $S$ , to używając relacji sąsiedztwa (tutaj oznaczony  $\eta$ ), można zdefiniować zbiór węzłów, które są sąsiadami węzła danego węzła  $x$  jako:

$$N(x) = \{y \mid y \in Nodes \wedge x\eta y\} \quad (18)$$

Zbiór wszystkich sąsiadów węzłów należących do zbioru  $S$  oznaczono jako:

$$N(S) = \{y \mid y \in Nodes \wedge (\exists x \in S \mid x\eta y)\} \quad (19)$$

Zakładamy, że relacja sąsiedztwa jest symetryczna:

$$x\eta y \Rightarrow y\eta x \quad (20)$$

Oznacza to, że jeżeli węzeł  $x$  pozostaje w relacji sąsiedztwa  $y$ , to  $x$  jest w stanie komunikować się z  $y$ . Następnie węzeł  $y$  jest również w relacji sąsiedztwa z  $x$ . W literaturze dotyczącej WSN zaproponowano kilka różnych modeli rejonów (locality) [Nikodem, J., Klempons, R., Nikodem, M., Woda, M. & Chaczko, Z. *Multihop communication in wireless sensors network based on directed cooperation, Selected papers on Broadband Communication, Information Technology & Biomedical Application, BroadBand - Com '09, pp. 239–24, 2009*]. Omawiane są również różne zalety i wady i klasteryzacji WSN oraz unikalnych ścieżek transmisji w kontekście stosowanych definicji sąsiedztwa. Jednak najbardziej akceptowane podejście do określenia rejonu jest oparte na koncepcji sąsiedztwa, które wynika z ograniczeń technologicznych komunikacji radiowej. W niektórych sytuacjach podział sieci na klastry może być bardzo korzystnym. Może to być postrzegane do pewnego stopnia, jako nadmierne uproszczenie sprawiające, że stosowne obliczenia będą znacznie łatwiejsze. Jednak kompromisem jest zmniejszenie przestrzeni rozwiązań. W przypadku pojedynczej ścieżki retransmisji przestrzeń rozwiązań składa się tylko z jednego elementu.

$$((N \subset WSN) \wedge (E \not\subset WSN)) \wedge ((N \cup E \subset S) \wedge (N \cap E = \emptyset)) \quad (21)$$

Weźmy pod uwagę rodzinę sąsiedztwa  $N = \{N_i \mid i \in I\}$ , dla której spełnione są następujące warunki:

$$(\forall_i \in I \mid N_i \neq \emptyset) (\cup_i N_i = Nodes) \quad (22)$$

$$(\exists^> i, y \in I \mid i \neq j) (N_i \cap N_j \neq \emptyset) \quad (23)$$

To przenosi się na tryb lokalny (każdego węzła) i ma postać:

$$(\forall y \in Nodes) (\exists^> i \in I \mid y \in \cap N_i \neq \emptyset) \quad (24)$$

Wyrażenie  $\exists^>$  oznacza "jest tak wiele przypadków na ile pozwala struktura sieci". Tak określone sąsiedztwo może być interpretowane, jako najbardziej naturalne (we wszystkich możliwych przypadkach), które może zagwarantować maksimum możliwości retransmisji dla wszystkich dopuszczalnych rozwiązań.

Wracając do koncepcji otoczenia (S), sąsiedztwa (N) i środowiska (E) możemy stwierdzić, że:

$$((N \subset WSN) \wedge (E \not\subset WSN)) \wedge ((N \cup E \subset S) \wedge (N \cap E = \emptyset)) \quad (25)$$

Sąsiedztwo jest zbiorem wszystkich sąsiednich otoczeń które należą do WSN, Środowisko (E) składa się z wszystkich elementów otoczenia, które nie należą do WSN, ale mają wpływ na jej zachowanie.

### 3.3.3.3.2. Tworzenie działań – Łańcuchy

Relacyjne zależności aktywnych łańcuchów (chain functions) w WSN opisują w większości przypadków powiązania między sąsiadującymi węzłami i dostosowują ogólne zasady otoczenia (neighbourhood). Z wszystkich czterech relacji, tylko relacja podporządkowania  $\pi$  jest przechodnia, co pozwala na modelowanie ścieżek retransmisji. Relacja  $\pi$ , która jest zarazem przechodnia i zwrotna, tworzy preorder w zbiorze działań Act (1). Do dalszych analiz wymagany jest mocniejszy porządek zbioru działań Act. Wprowadzenie częściowego porządku nie wydaje się być trudne. W aplikacjach czasu rzeczywistego, węzły są rozmieszczone mniej lub bardziej losowo na danym obszarze. W przypadku, gdy węzły dwóch sieci mogą znaleźć się bardzo blisko siebie, jeden z nich staje się milczący (mute) i pozostaje w rezerwie. W ten sposób utworzony zostaje pojedynczy węzeł komunikacyjny o znacznie większej odporności i przeżywalności. Można formalnie wyrazić takie "wiązaną" z dwóch elementów jako:

$$(\forall x, y \in Act) (x\pi y \wedge y\pi x) \Rightarrow (y = x) \quad (26)$$

Powyższe wyrażenie pokazuje, że podporządkowanie staje się asymetryczne, co z kolei może prowadzić do częściowego porządku zbioru (asymetryczny preorder). Dlatego zbiór działań Act jest częściowo uporządkowany (partial order - poset). W stosowanym aparacie formalnym występuje silniejsza relacja, niż występująca we wzorze (25). Jak pokazano w (5), relacja podporządkowania jest z natury antysymetryczna. Jest to zatem równoważne przeciwwzrotności (irreflexivity), gdyż każda relacja która jest antysymetryczna, jest zarówno asymetryczna i przeciwwrotna (irreflexive). Rzeczywiście, w WSN, w sytuacji, gdy węzeł transmituje do siebie, nie należy do kategorii zachowań sensownych. Przeciwwrotność Irreflexivity wprowadzona wraz z przechodnością zapewnia **ostry porządek** częściowy (strict partial order). Zbiór działań Act jest skończony i częściowo uporządkowany i może być reprezentowany na wiele sposobów. Jak każda dwuargumentowa relacja może być przedstawiony w postaci grafu lub rysunku. Dla takiego przedstawienia graficznego można wykorzystać schematy Hasse, które mogą być pomocne w pokazaniu relacji podporządkowania między parami elementów i całej struktury częściowej klasyfikacji zbioru działań. Chociaż schematy Hasse są prostymi i bardzo intuicyjnymi narzędziami do analizowania skończonych Posets, to okazuje się, że trudnym jest uzyskanie czytelnych diagramów "CLEAR" w bardziej złożonych sytuacjach, próbując przedstawić wszystkie możliwe połączenia komunikacyjne w strukturze WSN.

W większości przypadków, gdy stosuje się technikę Hasse, generuje się pierwszy graf z minimalnym zbiorem uporządkowanych elementów, a następnie stopniowo uzupełnia się o inne brakujące elementy. Zazwyczaj uzyskuje się raczej słabe i nieczytelne schematy. Zarówno struktura wewnętrzna oraz symetrie porządku już nie występują ze względu na dużą liczbę połączeń. Dlatego należy szukać lepszego rozwiązania. Proponowane podejście z wykorzystaniem relacji może doprowadzić do bardziej korzystnego rozwiązania dla przedstawienia połączeń w WSN. W wielu sieciach sensorowych multi-hop relacja podporządkowania, odzwierciedlająca aspekty komunikacyjne WSN, nie jest relacją spójną i skończoną. Oznacza to, że:

$$(\exists x, y \in Act) (\neg (x\pi y \vee y\pi x)) \quad (27)$$

Stąd, są elementy, dla których taka relacja nie istnieje, a więc relacja podporządkowania może być określona jako zbiór częściowo uporządkowany (partial order -poset). Możliwe jest wydzielenie takiego podzbioru tego zbioru, który jest liniowo uporządkowany. Wtedy częściowy porządek będzie dodatkowo spełniać warunek spójności:

$$(\forall x, y \in Act)(x\pi y \vee y\pi x) \quad (28)$$

Należy zauważyć, że wyrażenie to jest sprzeczne z poprzednim. W teorii mnogości uporządkowane podzbiory, dla których istnieje spójna relacja porządku, nazywana jest łańcuchem. Aby utworzyć łańcuch należy zdefiniować relację podporządkowania metodą indukcji:

$$\pi^n = \pi^{n-1} \circ \pi, \dots, \pi^2 = \pi^1 \circ \pi, \pi^1 = \pi \quad (29)$$

Stąd

$$\pi^n = \{ \langle x, y \mid x, y \in Act^{n-1} \times Act \rangle \} \quad (30)$$

Tu  $x$  nosi nazwę bezpośredniego następcy  $y$ , podczas gdy  $y$  będzie bezpośrednim poprzednikiem  $x$ . Podstawowym problemem w WSN jest uruchomienie działań komunikacyjnych multi-hop, ponieważ istotne jest pytanie, czy wiadomości z danego obszaru sieci mogą być przekazywane BS. W skali globalnej (obejmującej całą sieć WSN), w celu zbudowania właściwej struktury, która umożliwi nam znalezienie odpowiedzi na to pytanie, należy wykorzystać własności z teorii mnogości- domknięcie przechodniej, dwuargumentowej relacji podporządkowania (subordynacji)  $\pi$  na zbiorze  $Act$ . Jednakże, problem rozwiązywania aktywności komunikacyjnej jest postrzegany z poziomu lokalnego (sąsiedztwo węzła). Dlatego rozpatrzony będzie przypadek, gdy pakiet jest transmitowany z węzła  $y$  i po pewnej liczbie retransmisji powinien osiągnąć stację bazową (BS). Stosując relację  $\pi$  podporządkowania względem każdego węzła  $y$ , definiuje się zbiory jego następców  $Asc$  i poprzedników  $Des$ , wprowadzając następujące wyrażenia:

$$Asc_\pi(y) = \{ z \in Act \mid (\exists n \in N)(y\pi^n z) \} \quad (31)$$

$$Des_\pi(y) = \{ z \in Act \mid (\exists n \in N)(z\pi^n y) \} \quad (32)$$

Wyrażenia (30), (31) definiują zbiory z pełną przestrzenią komunikacji węzła  $y$ . Jednym z głównych celów jest znalezienie odpowiedzi na pytanie "do kogo wysłać pakiet w otwartej przestrzeni"? Dlatego zwraca się większą uwagę na zbiór  $Des_\pi$ . Warto zauważyć, że dla pakietu wysłanego z węzła  $y$  do miejsca przeznaczenia BS, niezbędne jest, aby stacja bazowa (SB) była jednym z elementów zbioru  $Des_\pi$ . Dodatkowo, możemy utworzyć wiele podzbiorów zbioru  $Des_\pi$  i niektóre z tych podzbiorów mogą być pomocne w określeniu aktywności komunikacyjnej w WSN. Wśród podzbiorów  $Des_\pi$  możemy wyróżnić dwa rodzaje podzbiorów:

- zbiory częściowo uporządkowane (cztery);
- rodzina dobrze uporządkowanych łańcuchów - (zbiory liniowo uporządkowane).

Wybrane uporządkowane łańcuchy mogą być określone jako:

$$Des_\pi^{\min}(y) = \{ x \in Des_\pi(y) \mid BS\pi x \} \quad (33)$$

Podzbiór (32) zawiera wybrane węzły, które są elementami bezpośrednimi (ascenders) do stacji bazowej (BS). Stąd tylko retransmisja, która obejmuje te węzły zapewnia, że pakiety wysyłane z węzła  $y$  osiągną BS. Moc tego zbioru określa liczbę pakietów, które mogą być dostarczane z  $y$  węzła do BS.

Drugi podzbiór

$$Des_\pi^{\max}(y) = \{ x \in Des_\pi(y) \mid x\pi y \} \quad (34)$$

zawiera węzły, które są bezpośrednimi następnikami (direct followers) węzła  $y$ . Są to węzły, które są niezbędne do wykonania retransmisji pakietu od węzła  $y$ . Moc tego zbioru określa maksymalną liczbę pakietów, które mogą być przesyłane z węzła  $y$  do stacji bazowej BS.

Trzeci podzbiór

$$Des_\pi^{\text{mis}}(y) = \{ x \in Des_\pi(y) \mid \neg(\exists n \in N)(BS\pi^n x) \} \quad (35)$$

zawiera węzły, które stają się ślepyim zaułkiem na ścieżkach do stacji bazowej. Pakiet, który jest przesyłany takimi węzłami, nie osiągnie celu - BS.

Czwarty podzbiór

$$Des_{\pi}^{pfix}(y) = \{x \in Des_{\pi}(y) \mid Card(Asc_{\pi}(x))=1\} \quad (36)$$

zawiera węzły nazwane pontifikes. Są to z węzły położone na skrzyżowaniach ścieżek pakietów. Węzły te stają się wąskimi gardłami na drodze routingu od węzła  $y$  do BS. Umiejętne kształtowanie aktywności komunikacyjnej umożliwia najlepsze wykorzystanie tych elementów. Moc zbioru węzłów pontifikes określa zdolność pakietu do zmiany jednej ścieżki routingu na inną w czasie transmisji do stacji bazowej (BS). Z punktu widzenia kształtowania się aktywności komunikacyjnej w WSN, druga grupa podzbiorów  $Des_{\pi}(y)$  jest najbardziej interesująca, gdyż reprezentuje rodziny łańcuchów, która formuje liniowo uporządkowane podzbiory. Dla każdej iteracji łańcucha  $Chn_{\pi}^i(y)$  ważne są następujące warunki:

$$(\forall Chn_{\pi}^i(y) \subset Des_{\pi}(y) \mid i \in I) (BS = \perp \wedge y = T) \quad (37)$$

Symbol  $\perp$  oznacza najmniejszy element BS a symbol  $T$  oznacza największy element(y). Węzły sieci WSN są odpowiedzialne za zbieranie informacji (działania indywidualne) i przekazywanie ich do stacji bazowej (działanie zbiorowe). Jak to zostało omówione wcześniej, takie działanie może być opisane za pomocą trzech relacji - podporządkowania, tolerancji i kolizji. Relacja podporządkowanie jest szczególnie istotna ze względu na jej przechodność i asymetrię. Zostało to wykorzystane przy rozbudowie symulatora. Rozważmy tylko relację podporządkowania i założmy, że węzeł  $x$  jest źródłem informacji. Wtedy zbiór  $\Pi(x)$  zawiera wszystkie węzły, do których węzeł ten może wysyłać bezpośrednio wiadomości. Dzięki relacji podporządkowania, węzeł, który otrzymuje informacje jest w stanie przekazać ją swoim sąsiadom będącym w relacji podporządkowania z nim. Dlatego można zdefiniować zbiór potomków węzła zawierający wszystkie węzły, do których mogą być wysłane wiadomości jako:

$$Des_{\pi}(x) = \{y \mid (\exists n \in N)(y\pi^n x)\} \quad (38)$$

gdzie  $\pi^n x$  oznacza, że istnieje  $n$  węzłów pośrednich  $y^{(i)}$ , takich, że można zbudować łańcuch relacji:

$$y\pi y_n, y_n\pi y_{n-1}, y_{n-1}\pi y_{n-2}, \dots, y_2\pi y_1, y_1\pi x \quad (39)$$

Jeśli podporządkowanie odzwierciedla kierunek w stronę stacji bazowej, to wtedy jest zapewnione, że BS należy do zbioru  $Des_{\pi}(x)$  dla każdego węzła  $x$ .

Dlatego każda wiadomość wygenerowana przez  $x$ , osiągnie w końcu stację bazową Ponadto, z właściwości podporządkowania oraz z faktu, że BS należy do  $Des_{\pi}(x)$ , wynika że komunikat wysłany z węzła  $x$  i retransmitowany do węzłów podporządkowanych, zawsze osiągnie do BS. Przy założeniu, że wszystkie węzły ścieżki komunikacyjnej mają wystarczające zasoby energii. Wynika to z własności przechodności relacji podporządkowania oraz z faktu, że w łańcuchu relacji (38) zachodzi  $y_i \pi x$  dla każdego  $i = 1, 2, \dots, n$  i  $y_i \pi y_j$ , dla  $i > j$ .

Ponieważ relacja podporządkowania jest asymetryczna, to oznacza, że w łańcuchu relacji każdy węzeł, występuje tylko raz. W przeciwnym razie, gdyby zachodziło:

$$y_{i+1} = y_j \quad (40)$$

dla jakiegoś  $i > j$ . Wtedy z faktu, że  $y_i \pi y_j$ , wynika, że  $y_j \pi y_i$ . Ponieważ jednak  $i > j$  więc  $y_i \pi y_j$ , co oznacza, że relacja staje się symetryczna, co przeczy założeniu (5). Oznacza to, że w łańcuchu relacji (38), każdy węzeł może wystąpić tylko raz. Z tego względu oraz ze względu na fakt, że  $Des_{\pi}(x)$  jest skończony i zawiera BS wynika, że dla każdego  $x$  istnieje skończony łańcuch relacji podporządkowania, który umożliwia osiągnięcie stacji bazowej BS, a mianowicie:

$$BS\pi y_n, y_n\pi y_{n-1}, y_{n-1}\pi y_{n-2}, \dots, y_1\pi x \quad (41)$$

Powyższe własności wynikają bezpośrednio z definicji zbioru  $Des_{\pi}(x)$ , która obejmuje tylko te węzły, które znajdują się bliżej BS niż w węzeł  $x$ . W rezultacie każdy węzeł  $y$  będący w łańcuchu relacji (40) jest bliżej BS dla każdego  $x$  i  $y_j$  dla  $i > j$ . Jeśli  $x$  jest zasięgu BS, wtedy zbiór  $Des_{\pi}(x)$  jest singletonem składającym się tylko z BS. Zbiór  $Des_{\pi}(x)$  składa się z węzłów  $y$ , które są



podporządkowane do  $x$  i połączonych sieciami. W sieciach tych każdy węzeł może komunikować się bezpośrednio lub za pomocą retransmisji z BS, tworząc jedną lub więcej łańcuchów relacji. Łańcuchy te mogą różnić się liczbą elementów, ale zawsze umożliwiają osiągnięcie stacji bazowej. Podobnych właściwości nie posiada relacja tolerancji, gdyż BS nie musi należeć do

$$Des_g(x) = \{y \mid \min(\exists n \in N)(y \mathcal{G}^n x)\} \quad (42)$$

Co więcej, nie ma gwarancji, że  $y_i \neq y_j$  w łańcuchu relacji tolerancji:

$$y \mathcal{G}_{y_n}, y_n \mathcal{G}_{y_{n-1}}, \dots, y_2 \mathcal{G}_{y_1}, y_1 \mathcal{G}_x \quad (43)$$

dla każdej kombinacji  $i \neq j$ .

Ponadto, nie ma gwarancji, że  $y_i \neq y_j$  w łańcuchu relacji tolerancji. Jest to bezpośrednia konsekwencja właściwości symetrii, co może prowadzić do pętli w sieci, gdzie część łańcucha zaczyna się i kończy w tym samym węźle, na przykład

$$x \mathcal{G}_{y_n}, y_n \mathcal{G}_{y_{n-1}}, \dots, y_2 \mathcal{G}_{y_1}, y_1 \mathcal{G}_x \quad (44)$$

W rezultacie łańcuch relacji tolerancji może być nieskończony, nawet jeśli  $Des_g(x)$  jest zawsze zbiorem skończonym (liczba węzłów w sieci jest skończona).

Powyższe rozważania pokazują, że relacja tolerancji nie wystarcza do tego, aby współpraca w ramach WSN doprowadziła do prawidłowego routingu (kierowania) komunikatów. Zatem nie jest gwarancją dostarczenia wiadomości do stacji bazowej.

Jednak relacja tolerancji ma cechy, które sprawiają, że jest bardzo przydatna, jako narzędzie pomocnicze dla relacji podporządkowania. W rzeczywistych zastosowaniach może być szczególnie użyteczna przy problemach lokalności (20) rejonów (locality). Lokalności. Odpowiada to sytuacji, gdy podzielone problemy nie mogą być rozwiązane lub nie poprawiają wyników ogólnych. Podobnie w WSN, relacja tolerancji pozwoli na zmianę ścieżki routingu w celu uniknięcia utraty wiadomości (np. z powodu dead ends). W skrajnym przypadku relacja tolerancji może zmusić węzeł do wysyłania pakietu z powrotem do ascender - poprzednika, w celu wybrania alternatywnej ścieżki routingu. Złożenie relacji podporządkowania i tolerancji zwiększa zalety obu relacji. Podporządkowanie zapewnia, że wiadomości zawsze dotrą do stacji bazowej, podczas gdy tolerancja zwiększa liczbę dostępnych ścieżek komunikacyjnych.

### 3.3.3.4. Symulacja zachowań WSN

Symulator sieci opracowano w celu przedstawienia relacyjnego podejścia zachowania modelującego i działania WSN. Symulator modeluje zachowanie każdego niezależnie działającego czujnika, który powinien spełnić globalnie określone kryteria przy uwzględnieniu warunków jego otoczenia. Do konfiguracji i poprawnego działania symulatora wymagane jest Środowisko MATLAB. Symulator został napisany i został przetestowany w wersji MATLAB R2009b. Używane były tylko podstawowe funkcje środowiska MATLAB, więc nie są uruchamiane dodatkowe zestawy narzędzi (Toolboxes). Praca z symulatorem rozpoczyna się od wprowadzenia parametrów konfiguracji (Faza I). Obejmuje to takie parametry jak wielkość sieci, liczba czujników, itp. To stadium jest zwieńczone rozmieszczeniem czujników w określonym obszarze roboczym i widoczne jest w głównym obszarze wizualizacji symulatora. Pierwszym działaniem w Fazie II, jest wybór jednego z siedmiu dostępnych algorytmów w symulatorze. Następnie, zależnie od dokonanego wyboru, można zmieniać parametry domyślne algorytmu. Na tym etapie można również zdecydować, jak przedstawić wyniki symulacji i jej szczegóły, ustawiając dodatkowe parametry w oknie konfiguracyjnym. Zatwierdzenie zmian konfiguracyjnych wykonanych na tym etapie pozwala na przejście do Fazy III. Symulacja rozpoczyna się, po wciśnięciu przycisku RUN SIM. Od tego momentu, symulacja trasy w czasie, jak i parametry wyników symulacji są wizualizowane na ekranie w postaci grafów i wyników liczbowych. Wyniki symulacji mogą być również zapisywane do pliku AVI. Podczas symulacji, użytkownik może ją kontrolować poprzez zatrzymanie i wznowienie. Korzystając z panelu sterowania symulacji lub okna konfiguracji, można zmienić wygląd okna wizualizacji. Zakończenie procesu symulacji kończy Faza III. Przycisk DATA RESET pozwala użytkownikowi na powrót do pierwszego etapu i wznowienie symulacji od początku (ewentualnie z nowymi parametrami). W głównym oknie symulatora zdefiniowano podstawowe parametry WSN. Symulacją jest wizualizowane i prezentowane są informacje o aktualnym stanie symulacji (liczba pętli, liczba wiadomości, itp.) oraz wartości parametrów sieci (średni koszt energii, żywotności, itp) . Podstawowe parametry sieciowe wprowadzane przez użytkownika są następujące:

- wielkość sieci i jej otoczenia/sąsiedztwa - poprzez definicję prostokątnego obszaru, w którym będą rozmieszczone wierzchołki WSN. Ponieważ jeden z wierzchołków obszaru stale znajduje się w punkcie (0,0), obszar ten jest zdefiniowany przez określenie długości dwóch boków prostokąta wzdłuż osi X i Y ("Wielkość sieci" pola). Należy zauważyć, że aktualnie symulator operuje w sieci dwuwymiarowej (2D);
- położenie stacji bazowej
  - Założono, że istnieje tylko jedna stacja bazowa w WSN, która może być usytuowana w dowolnym punkcie na powierzchni obszaru sieci;
- liczba parametrów i czujników - Symulator pozwala kontrolować takie parametry sieci jak liczba rozmieszczonych węzłów WSN ("Sensor - Number"), maksymalny zasięg komunikacji pojedynczego węzła ("Sensor - Range") i energii początkowej każdego węzła ("Sensor -Energy "). Przy ustalaniu liczby węzłów i ich maksymalnego zasięgu, należy wziąć pod uwagę fakt, że te parametry są związane z rozmiarem sieci. Ustawienie zbyt małej liczby węzłów lub zbyt krótkiego zasięgu komunikacji może spowodować rozłączenie się sieci (niektóre węzły sieci nie będą mogły komunikować się ze stacją bazową). Mając dany obszar danej sieci (P) i maksymalny zasięg komunikacji z węzłem (R), można oszacować liczbę węzłów wymaganych do zapewnienia komunikacji w sieci. Należy pamiętać, że jeżeli w każdym obszarze koła o średnicy  $R / 2$  znajduje się przynajmniej jeden węzeł, wtedy dowolne dwa węzły znajdujące się w dwóch sąsiadujących ze sobą obszarach zawsze będą w stanie komunikować się bezpośrednio. Będzie to zapewnione niezależnie od ich położenia w tym obszarze.

Ponieważ obszar całej sieci jest prostokątny, zakładamy, że koło o średnicy  $R / 2$  może być przybliżona przez kwadrat o przekątnej  $R / 2$  wpisany w okrąg. Oprócz tych parametrów, użytkownik może mieć wpływ na rozmieszczenie węzłów WSN. Założono, że węzły w Symulatorze są rozmieszczone równomiernie w całej sieci (co jest założeniem powszechnie przyjętym w literaturze). Można kontrolować rozmieszczenie węzłów poprzez identyfikację Ziarna /Seed generatora liczb losowych. Korzystając z rozwijanej listy, można określić, czy rozmieszczenie węzłów powinno być całkowicie losowe dzięki określeniu Ziarna / Seed przez użytkownika. W tym przypadku wybrana powinna pozycja "By Defined Seed" umożliwiająca wprowadzenie Ziarna/ Seed generatora w oknie. Dlatego rozmieszczenie węzłów w sieci może być generowane wielokrotnie, a tym samym możliwe będzie porównanie działania sieci przy różnych ustawieniach parametrów symulacji i relacji. To samo okno umożliwia określenie algorytmu routingu używanego do komunikacji (pole "Rodzaj algorytmu"). Aktualnie symulator realizuje trzy grupy algorytmów w siedmiu różnych wariantach

Są to następujące grupy:

- 'Shift register' - rejestr przesuwny;
- 'Energy balanced' - zrównoważona energia;
- HEED.

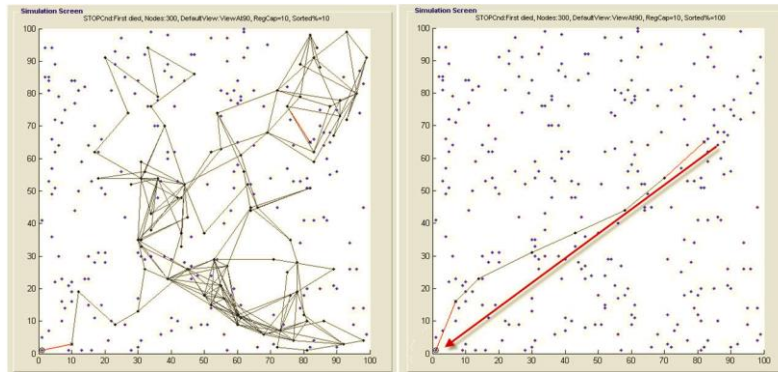
Różnią się one zasadami pracy, kryteriami wyboru ścieżek komunikacyjnych i regułami określania porządku relacji. Główna różnica pomiędzy pierwszymi dwoma grupami a HEED jest taka, że HEED jest standardowym protokołem hierarchicznym (*p. cytowani już Fahmy& Younis (2004)*), który nie korzysta z mechanizmu relacji. Pozostałe dwie grupy różnią zasady określania porządku węzłów w relacjach. Dla grupy algorytmów 'Shift register' porządek jest ustanawiany tylko raz - po rozmieszczeniu węzłów, podczas inicjalizacji sieci. To odróżnia te algorytmy od algorytmów 'Energy balanced' gdzie określenie porządku ma miejsce po wysłaniu każdej wiadomości przez węzeł. Klasyfikacja jest wykonana przez węzły, które wysłały, otrzymały lub odebrały informacje o wiadomościach wymienianych między sąsiednimi węzłami. Dla obu grup, porządek dotyczy części wszystkich węzłów WSN. Jest to wyznaczone przez określenie wielkości procentu węzłów w oknie 'Sorted nodes [%]'. Wartość ta określa, jaka część węzłów będzie klasyfikować swoje sąsiednie węzły w zależności od rosnącej odległości od stacji bazowej (w grupach "Shift register") lub w zależności od zmniejszenia pozostałej energii (dla grupy "Energy balanced"). Pozostałe węzły nie klasyfikują - uporządkowują swoich sąsiednich węzłów. Oznacza to, że porządek relacji sąsiadów zależy od kolejności (porządku), w której węzeł otrzyma wiadomość o ich istnieniu. Relacja dla każdego węzła jest reprezentowana w symulatorze jako wektor (Register) sąsiednich węzłów. Porządek węzłów w obrębie wektora odpowiada relacji uporządkowania między węzłami.

W obecnej wersji symulatora dostępnych jest siedem algorytmów routingu:

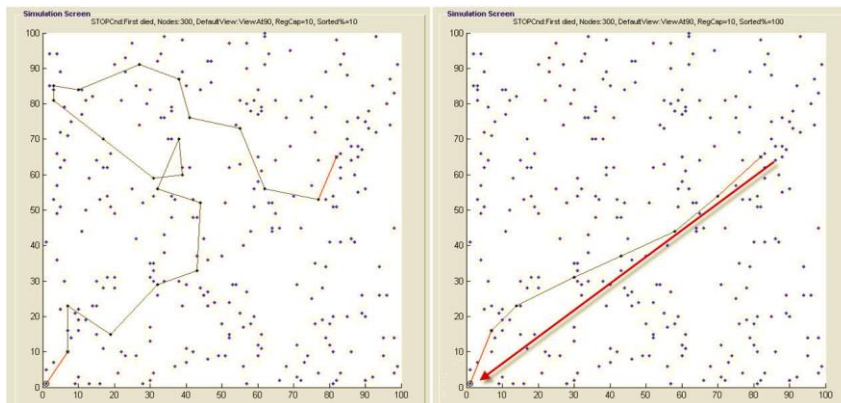
1. Shift Register - to algorytm, w którym każde sąsiedztwo węzła (reprezentowane jako wektor) zachowuje się jak cykliczny rejestr przesuwany. Przesuw występuje tylko z relacją podporządkowania i komunikaty są zawsze wysyłane do pierwszego węzła z rejestru. Parametrem tego algorytmu jest intensywność innej relacji podporządkowania, która określa liczbę podporządkowanych sąsiadów danemu węzłowi. Parametr ten określa liczbę sąsiadów (licząc od początku wektora) branych pod uwagę w momencie, gdy węzeł może wysłać wiadomość.
2. Shift Register [%]- algorytm jest podobny do poprzedniego, ale intensywność relacji podporządkowania wyraża się poprzez określenie procentowej wielkości sąsiadów, które są w relacji podporządkowania zamiast liczby węzłów.
3. Shift Register [Card( $\Pi$ ) = k] - w tym algorytmie relacja podporządkowania obejmuje tylko sąsiednie węzły, które są bliżej stacji bazowej niż aktualny węzeł. W porównaniu z algorytmem "Shift register", różnica jest taka, że w algorytmie "Shift register" relacje podporządkowania mogą składać się z dwóch węzłów, które są bardziej oddalone od stacji bazowej, niż aktualny węzeł. W omawianym algorytmie, taka sytuacja nigdy nie nastąpi, gdyż nie ma pewności, że najlepsi sąsiedzi (będący najbliżej stacji bazowej) będą w relacji podporządkowania. Na przykład może się to zdarzyć, jeśli rejestr, który reprezentuje relację, nie jest posortowany.
4. Energy Balanced - to algorytm, w którym relacja podporządkowania składa się z wielu sąsiadów w lewej części wektora (posortowanych lub nie), a liczba węzłów w relacji jest parametrem algorytmu. Wiadomość zostanie wysłana do pierwszego węzła wektora. Po każdym wysłaniu wiadomości, węzeł sortuje wektor według ilości energii pozostałej w sąsiadujących węzłach.
5. Energy Balanced [%] - algorytm ten jest podobny do poprzedniego, ale różnica polega tym, że intensywność relacji podporządkowania jest określona wartością procentową sąsiednich węzłów będących w relacji.
6. Energy Balanced [Card( $\Pi$ ) = k] – algorytm podobny do algorytmu "Shift register [Card( $\Pi$ ) = k]" również ogranicza relację podporządkowania się tylko do tych sąsiadów, które są bliżej stacji bazowej niż bieżący węzeł.
7. HEED - jest to jeden z najbardziej popularnych algorytmów hierarchicznych, który określa reguły grupowania sąsiednich węzłów w klastry i reguły przesyłania wiadomości w WSN. Algorytm ten został zaimplementowany w celu porównania z wymienionymi wyżej relacyjnymi propozycjami opartymi na routingu i komunikacji.

#### 3.3.3.4.1. Organizacja sąsiedztwa i efektywnej komunikacji sieciowej

W fazie samoorganizacji wykonanej przed właściwą operacją sieci, każdy węzeł zbiera informacje o swoim sąsiedztwie. Następnie za pomocą globalnie zdefiniowanej metryki (wyrażonej w liczbie retransmisji lub euklidesowej odległości od stacji bazowej) określa swoje sąsiedztwo, czyli sortuje węzły zgodnie z wielkością pozostałej energii w sąsiednich węzłach. Liczba węzłów w sieci przeprowadzających takie uporządkowanie jest określana przez jeden z parametrów i wyznacza stopień uporządkowania sąsiedztwa. Oceniono wpływ tego parametru w wielkości powierzchni komunikacyjnych (czyli powierzchni zajętej przez węzły, które biorą udział w routingu wiadomości), liczbę węzłów pośrednich i efektywność energetyczną stosowanych algorytmów. Parametr "Sorted Nodes [%]" określa procent węzłów sortujących swoje sąsiednie węzły, stosownie do rosnącej odległości od BS. Inne węzły nie sortują otoczenia, co oznacza, że porządek sąsiadów zależy od porządku, w którym węzeł "dowiedział się" o ich istnieniu. W pozostałej części tego punktu przedstawione są wyniki symulacji oraz wnioski. Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone przy ustalonych wartościach parametrów i zamieszczono w Tabeli 1. Zmiana liczby utworzonych sąsiedztw ma znaczący wpływ na wydajność wszystkich testowanych algorytmów. I tak, gdy parametr "Sorted Nodes [%]" miał wartość 10% dla obu algorytmów „Shift register [Card( $\Pi$ ) = k] i „Energy balanced „[Card( $\Pi$ ) = k]”, a obszar komunikacji jest albo bardzo duży (Rys. 1) albo duży (Rys. 2). Warto zauważyć, że algorytmy z grupy „Energy balanced”, podczas pracy z tymi samymi parametrami, charakteryzują się niższą średnią liczbą węzłów pośrednich koniecznych do przekazywania wiadomości do BS.



Rys<sup>9</sup>. 1. (Fig. 5. Algorithm 'Shift register [Card( $\Pi$ ) = k]' with 'Sorted Nodes [%]' parameter equal 10% (left) and 100% (right) - retransmission path view, Relation-based message routing...).



Rys.2 (Fig. 6. Algorithm 'Energy balanced [Card( $\_$ ) = k]' with 'Sorted Nodes [%]' parameter equal 10% (left) and 100% (right) - retransmission path view, Relation-based message routing...).

Kiedy wartość parametru 'Sorted Nodes [%]' zmienia się z wielkości 10% do maksymalnej wartości 100%, to poprawa nie jest zdecydowanie zauważalna dla obydwu algorytmów. Obie ścieżki mają mniej skomplikowany kształt - podobny do prostej, a tym samym doprowadzają do stacji bazowej, z mniejszą liczbą hop - ów, co z kolei prowadzi do poprawy wydajności energetycznej.

Tabela 1. (Table 1. WSN and simulation parameters, Relation-based message routing...).

WSN parameters.	
Number of sensors	300
WSN area	100×100
Position of the BS	x=1, y=1
Sensor communication range	20
Initial node energy	300
Energy cost of message sent	5
Simulation parameters	
Number of messages to send	300
Communication to the BS	from one selected node
Number of iterations	300
Deployment of nodes	random with fixed seed equal 10

Algorytmy z grupy 'Shift Register' można podzielić ze względu na wybór następcy (następnika) kolejnych węzłów w ścieżce routingu wiadomości, transmitowanej do BS:

- numeryczne - wartość parametru 'Reg. capacity' określa liczbę sąsiednich węzłów, z których kolejny węzeł jest usuwany, jeśli będą z niego wysyłane wiadomości.

<sup>9</sup> W rozdziale tym rysunki i tabele opisywane są według reguły: najpierw kolejny numer rysunku, dalej numer rysunku i jego opis z omawianej pracy zgodnie z listą prac (1 do 4) w p. 3.3.3 C 2. *Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Woda Marek, Klempous Ryszard, Chaczko Zenon: Relation-based message routing in wireless sensor networks: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka : InTech, 2010. s. 127-145.* W nawiasie podany jest skrót tytułu tej pracy.

- procentowe – wartość podobna do poprzedniej, ale wielkość parametru 'Reg. capacity' określa procent sąsiadów tworzących zbiór, z którego zostanie usunięty kolejny węzeł.
- kierunkowe - wartość parametru 'Reg. capacity' definiuje wielkość procentową sąsiadów stanowiących zbiór  $Des_{\pi}^{\max}(x)$  - zbiór węzłów podporządkowanych aktualnemu węzłowi (x).

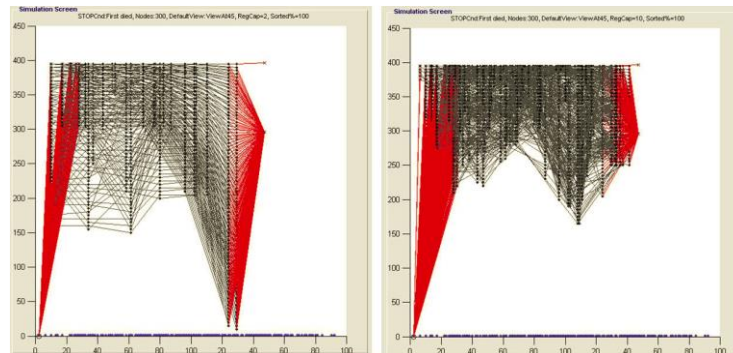
Wybór numeryczny jest najmniej skutecznym sposobem, ponieważ pozwala na wybór retransmiterów bez żadnych ograniczeń. Mogą być wybrane nawet te węzły, które nie leżą na pożądanym kierunku transmisji w stronę stacji bazowej. Ten rodzaj doboru retransmiterów nie uwzględnia pewnej liczby węzłów w sąsiedztwie, która jest właściwością każdego węzła sieci i może się znacznie różnić w całej sieci. Na Rys.3 przedstawiono jak wybór liczby potencjalnych retransmiterów, odpowiednio do liczby węzłów w sąsiedztwie, poprawia sprawność transmisji. Wartość 'Reg. capacity' równa zero pozwala na wysyłanie takiej samej liczby pakietów, ale bez osiągnięcia stanu niedoboru energetycznego w niektórych węzłach. Przykładowo, jak wynika z Rys.3,  $Card(Des_{\pi}^{\max}(x)) = 10$  jest najlepszą wartością. Taka wartość może być nieodpowiednia dla innych węzłów. Przeprowadzone testy wykazały, że to podejście, korzystające z algorytmów procentowych, jest bardziej korzystne, jeśli

$Card(Des_{\pi}^{\max}(x))$  odpowiada liczbie węzłów w sąsiedztwie. Dlatego też, dla każdego węzła sieci liczba węzłów w  $Des_{\pi}^{\max}(x)$  może różnić się, ale jeśli jest wyrażana procentowo, to jest niezmienna i jest dostosowana do lokalnej sytuacji konkretnego węzła. Pozwala to na kształtowanie zarówno efektywności energetycznej jak i wielkości obszar u komunikacji.

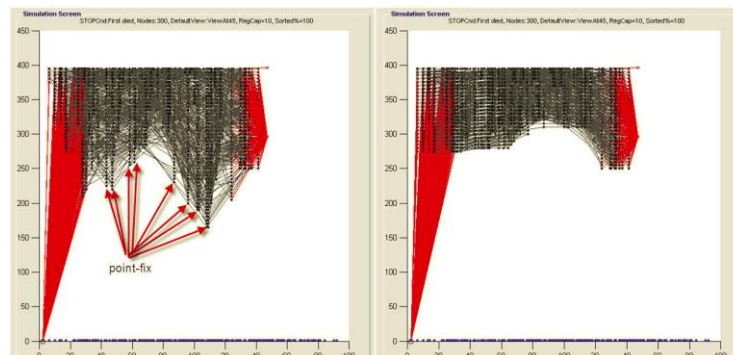
Dobór kierunkowy uwzględnia sąsiadów nadajnika, ale tylko tych, które są z nim w relacji podporządkowania. Pozwala to na kształtowanie aktywności komunikacyjnej WSN przez przyjęcie  $Card(Des_{\pi}^{\max}(x))$  wartości wyrażonej w procentach sąsiednich węzłów. Stąd też nie jest możliwe, bez względu na wartość parametru 'Reg. capacity', wysłanie wiadomości w innym kierunku, niż w kierunku stacji bazowej. Najlepszym podejściem jest uwzględnienie kosztów energii. Jednak, jak to można zauważyć na Rys.4, na powstałej powierzchni komunikacyjnej, problemem stają się punkty odbierające wiadomości od wielu węzłów - pontifikes. Węzły te, odbierając wiadomości od licznych węzłów, są przeciążone (Rys.4 lewy). Rozwiązaniem w takiej sytuacji jest uwzględnienie w strategii kosztów energii, co zapewnia jednolite, zależne tylko od struktury sieci, zrównoważone zużycie energii (Rys.4 po prawej). Główna różnica tych algorytmów, w porównaniu z "Shift Register", polega na równomiernym zużyciu energii w całej sieci. Jest to bardzo ważny aspekt systemów rzeczywistych, gdyż niedobór energii w jednym czujniku może zakłócić pracę całej sieci. Algorytmy grupy 'Energy Balanced' dążą do zrównoważonego obciążenia węzłów rozsyłających wiadomości. Zwiększa to z kolei średnie zużycie wymaganej energii transmisji komunikatu do stacji bazowej. Uproszczając, można stwierdzić, że w tych algorytmach każdy węzeł retransmituje wiadomości kolejno do wszystkich swoich sąsiadów. Podczas transmisji między sąsiednimi węzłami, wybierani są tylko tacy sąsiedzi, którzy mają największy zapas energii. Działanie tych algorytmów pozwala na dużą oszczędność energii dla węzłów, które w przeciwnym razie szybko przestałyby działać („umierają”). Są to węzły "pontifikes (węzły popularne)", w których zbiegają różne ścieżki komunikacyjne. Algorytmy 'Energy balanced' bardzo dobrze radzą sobie z taką sytuacją. Zwiększone zużycie energii dla tych węzłów widać bardzo dobrze z lewej strony Rys.4. Natomiast prawie całkowicie zrównoważone zużycie energii występuje wtedy, gdy wszystkie węzły są zaangażowane w transmisję wiadomości. (Rys.4 po prawej stronie).

Przedstawiono relacyjne podejście do modelowania zachowania bezprzewodowej sieci sensorów (WSN). Model opiera się na relacjach, które pozwalają na przedstawianie globalnie określonych celów sieci, a także na opisanie działania jednego węzła. Węzeł ten ma ograniczoną informację na temat sieci. Trzy relacje (podporządkowanie, tolerancji i kolizji) mogą być użyte do modelowania komunikacji i sterowaniem ścieżek routingu. Ścieżki te są używane do przesyłania wiadomości od źródła do stacji bazowej. Chociaż najlepsza konfiguracja parametrów relacji nie jest jeszcze znana, symulacje pokazują, że dostosowanie intensywności relacji umożliwia sterowanie poborem mocy i wydłuża żywotność sieci. Polepszenie to wynika z faktu, że każdy węzeł sieci może adoptować swoje działania zgodnie z aktualną sytuacją w jego otoczeniu, a nie ściśle według pewnego predefiniowanego algorytmu routingu.

Podejście to jest również bardziej ogólne niż algorytmy routingu prezentowane do uprzednio. Ponadto zawiera wszystkie poprzednie propozycje.



Rys. 3 (Fig. 7. Energy loses in the network operating according to 'Shift register' algorithm with 'Reg.capacity' parameter set to 2 (left) and 10 (right), Relation-based message routing...).



Rys.4. (Fig. 8. Energy loses in the network operating according to 'Shift register '[Card( ) = k]' (left) and 'Energy balanced' (right) with 'Reg. capacity' parameter set to 10, Relation-based message routing...).

### 3.3.3.5. Zorientowana (directed) współpraca w sieci multi-hop

W WSN węzły mogą identyfikować swoich sąsiadów. Z powodu ograniczonego zasięgu łącza radiowego tylko niektóre węzły mają bezpośredni kontakt ze stacją bazową (BS). Transmisja odbywa się trybie multihop, a informacje są przesyłane z jednego węzła do drugiego w kierunku BS. Proponuje się relację podporządkowania  $\pi$  oznaczającą współpracę między węzłami i uwzględniającą własności topologiczne sieci. Na podstawie odległości (hop-distance) od stacji bazowej (BS) dla każdego węzła  $k$  można wyznaczyć zbiór  $N <(k)$ , składający się z węzłów, do których węzeł  $k$  powinien wysłać wiadomości, aby utrzymać kierunek przepływu danych w stronę BS.

Ze względu na rozkład przestrzenny i ograniczoność zasobów, aktywność czujników koncentruje się na lokalnych działaniach i komunikacji wzajemnej. Umożliwia to WSN wykonywanie zadań, które pojedynczy czujnik nie może wykonać, powodując że komunikacja staje się jednym z najbardziej istotnych elementów działalności węzła. Informacje zebrane przez czujniki w danym obszarze są transmitowane do stacji bazowej (BS). Z powodu ograniczeń mocy i niewielkiego zakresu komunikacji każdego węzła, transmisja odbywa się w trybie multi-hop, a informacje są przesyłane z jednego węzła do drugiego kierunku BS.

Podejście prezentowane w pracy:

Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Directed cooperation in multihop wireless sensors network. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2010, vol. 56, nr 1, s. 7-11*; wykorzystuje tak zwaną komunikację przestrzenną, która przewyższa komunikację opartą na ścieżkach transmisji. Celem jest skonstruowanie wielokrotnych ścieżek komunikacyjnych w kierunku BS, poprzez które będzie wysyłana informacja. Budowa ścieżek jest oparta na lokalnej informacji zebranej przez węzeł, który otrzymał wiadomość. Opierając się na tej wiedzy, węzeł decyduje gdzie należy dalej przekazać wiadomość. Umożliwia to dzielenie kosztów komunikacji pomiędzy wiele ścieżek komunikacyjnych oraz węzły. Ponadto, zwiększa odporność i bezpieczeństwo sieci, ponieważ ścieżka komunikacji może być zmieniona w przypadku zakłóceń lub przechwycenia węzła.

Budowa ścieżki routingu multihop wymaga współpracy węzłów sąsiedzkich w celu ustanowienia ścieżki komunikacji. Niezależnie od tego, czy konstruowana jest jedna lub wiele ścieżek, celem algorytmu routingu jest zbudowanie ścieżki komunikacji skierowanej do BS. W związku z tym, praca jednego węzła podczas wyznaczania ścieżki koncentruje się na osiągnięciu BS. Dodatkowe kryteria (takie jak minimalne koszty energii, minimalna liczba multi-hops, itp), wyrażone w wielkościach funkcyjnych, powinny być zminimalizowane tak, aby węzeł wybrał w właściwy sposób drogę transmisji informacji. Jest to zupełne przeciwieństwo komunikacji przestrzennej, gdzie wykorzystuje się zalety relacji. Nie jest określone precyzyjnie, do których kolejnych węzłów powinny być wysłane informacje, Zamiast tego, wymagane jest spełnienie pewnych relacji między węzłami podczas ustanawiania przestrzennej ścieżki komunikacji. Zakłada się, że węzły współpracując lokalnie w sąsiedztwie, wykorzystują lokalne kryteria i podejmują lokalne decyzje. Problemem stają się kryteria lokalnej optymalizacji, które powinny zapewnić, że wyznaczona ścieżka komunikacji przestrzennej spełnia kryteria określone w skali globalnej. Kooperacja (współpraca) oparta na relacji między węzłami wykorzystuje właściwości topologii sieci, a nie jest skierowana do konkretnego kierunku - węzły po prostu współpracują w sąsiedztwie. Jednakże cel WSN polega na zbieraniu informacji od sensorów i przesyłaniu jej do BS. Zatem węzły, które działają w sąsiedztwie muszą zapewnić, w oparciu podejmowane lokalnie decyzje, że mogą ustalać ścieżki routingu multihop dla węzłów sieci w kierunku BS. Pokazane będzie wykorzystanie relacyjnie zorientowanej współpracy w sąsiedztwie oraz konstrukcja przestrzennej ścieżki komunikacyjnej na podstawie podejmowanych lokalnie decyzji, spełniającej kryteria określone w skali globalnej.

Istnieją algorytmy routingu, które pozwalają na przesyłanie informacji między węzłami i BS w WSNs. Tak zwane algorytmy płaskie (np. powodziowe) zapewniają, że każda informacja dotrze do BS, chyba że brak jest węzła komunikującego się bezpośrednio z BS [D. Braginsky and D. Estrin, *Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks*, Proc. of the 1-st Workshop on Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, October 2002; M. Burmester, T.V. Le, A. Yasinsac, *Adaptive gossip protocols: Managing security and redundancy in dense ad hoc networks*, Ad Hoc Networks, Volume 5, Issue 3, pp. 313-32, 3April 2007]. Protokoły te, używając transmisji, po prostu zalewają całą sieć wszelkimi informacjami, powodując kolizje w kanałach komunikacji i retransmisji. Oprócz strat energii, zalewanie zmniejsza również dostępność pasm komunikacji, obniżając prędkość transmisji. Zdarza się też, że po prostu usuwane zostają niektóre części sieci. Wady te są zminimalizowane w Gossip Protocol [A.Datta, S.Quarteroni, K.Aberer, *Autonomous Gossiping: A Self-Organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Wireless Mobile Ad-Hoc Networks*, LNCS, Springer Berlin / Heidelberg, vol.3226/2004, *Semantics of a Networked World*, pp.126-143, 2004.], gdzie transmisja dotyczy tylko sąsiednich węzłów komunikacyjnych. Protokoły routingu, takie jak Data Centric Routing (DCT), Sensor Protokół for Information via Negotiation (SPIN) próbują orientować komunikację w stronę czasu, zapytań, zdarzeń (DCT) lub wymogów informacyjnych (SPIN). Zorientowany Diffusion Protocol pozwala na zminimalizowanie zużycia energii w trakcie routingu, ale obniża efektywność (głównie ze względu na dużą liczbę zapytań) i to jest jego wadą. Rumor Routing [D. Braginsky and D. Estrin, *Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks*, Proc. of the 1-st Workshop on Sensor Networks and Applications, Atlanta, GA, October 2002] jest kolejną próbą korzystania z agentów i zorientowanej komunikacji. Daje to dobre wyniki dla ograniczonej liczby sytuacji, gdy koszty dodatkowych agentów są nieznaczne w stosunku do ogólnych kosztów. Hierarchiczne protokoły, takie jak LEACH, TEEN i PEGASIS [A. Manjeshwar, D.P. Agrawal, *TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks*, Parallel and Distributed Processing Symposium, International, vol. 3, pp. 30189a, 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'01) Workshops, 2001; J.Sung-Min, H.Young-Ju, C.Tai-Myoung, *The Concentric Clustering Scheme for Efficient Energy Consumption in the PEGASIS*, The 9th International Conference on Advanced Communication Technology, Vol.1, page(s): 260-265, 2007.] tworzą zorientowaną (directed) komunikację. Realizowane to jest poprzez klasteryzację lub podział na strefy. Propozycja ta wykorzystuje protokoły routingu oparte na drzewie lub strukturach łańcuchowych. Wszystkie wyżej wymienione protokoły muszą tworzyć jedną multi-hop ścieżkę komunikacyjną pomiędzy dowolnym węzłem a BS. Jeśli jest to energicznie uzasadnione, jest stosowana tak utworzona ścieżka komunikacyjna [Q.Fang, J.Gao, L.J.Guibas, V. de Silva, L.Zhang, *GLIDER: gradient landmark-based distributed routing for sensor networks*, INFOCOM 2005, 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 13-17 March 2005, vol.1, pp.339-350, 2005; A.Lim, *Distributed Services for Information Dissemination in Self-Organizing Sensor Networks*, Distributed Sensor Networks for Real-Time Systems with Adaptive Reconfiguration, Journal of Franklin Institute, Elsevier Sciences Publisher,

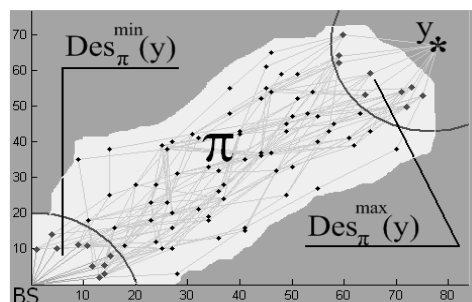
vol.338, pp.707-727, 2001.]. Jeżeli poziom energii węzła należącego do ścieżki spadnie poniżej określonej wielkości, wtedy algorytm generacji ścieżki komunikacji uruchamia się ponownie.

### 3.3.3.5.1. Relacje, łańcuchy działań

Omawiane podejście wykorzystuje trzy podstawowe relacje binarne zdefiniowane na zbiorze operacji (ACT), która opisują aktywność komunikacyjną w WSN. Te trzy relacje: kolizja ( $\chi$ ), podporządkowanie ( $\pi$ ) i tolerancji ( $\vartheta$ ), zostały wprowadzone i opisane przy omawianiu pierwszej pozycji tego punktu ( wzory od (1) do (43).

Praca [J.Nikodem, R.Klempous, Z.Chaczko, *Modelling of immune functions in a wireless sensors network. 20th European Modeling and Simulation Symposium. EMSS 2008, Campora S. Giovanni, Italy, 2008*] przedstawia sposób zastosowania relacji  $\pi$ ,  $\vartheta$ , i  $\chi$  w modelowaniu komunikacji przestrzennej. Podporządkowanie  $\pi$  jest odpowiedzialne za określenia ścieżki multi-hop, tolerancja  $\vartheta$  pozwala na istnienie wielu ścieżek jednocześnie, podczas gdy kolizja określa ograniczenia dotyczące przestrzeni komunikacyjnej. Przedmiotem analizy jest relacja podporządkowania  $\pi$ , gdyż relacja ta odgrywa najważniejszą rolę w wyznaczaniu ścieżki komunikacyjnej multi-hop. Jest to również jedyna relacja, która jest przechodnią, umożliwiającą skonstruowanie łańcuchów węzłów w WSN, które umożliwią ustalania ścieżek komunikacyjnych. Ponieważ relacja podporządkowania  $\pi$  jest przechodnia możemy zdefiniować łańcuch podporządkowania relacji, jak omawianej uprzednio pozycji tego punktu (p. (25-36)).

Łańcuch relacji podporządkowania określa  $\pi^n$ , gdzie  $x$  jest najbliższym następnikiem  $y$  (or vice versa). Najważniejsze podzbiory zbioru  $Des_\pi(y)$  to zbiory  $Des_\pi^{\max}(y)$ ,  $Des_\pi^{mis}(y)$  i  $Des_\pi^{\min}(y)$ . Są to zbiory (32), (33), (35) i (34) z pierwszej pozycji tego punktu. Zbiór  $Des_\pi(y)$  jest zbiorem najbliższych następników stacji bazowej, a  $Des_\pi^{\max}(y)$  jest zbiorem najbliższych poprzedników  $y$  – Rys. 1 ( Fig. 1  $Des_\pi(y)$  area in WSN). Z pozostałych podzbiorów  $Des_\pi(y)$  uwzględnione będą tylko te, które związane są z ścieżką komunikacyjną od węzła  $y$  do BS. Zbiory te (łańcuchy) oznaczone są przez  $Chn_\pi(y)$  i proponowana relacja podporządkowania  $\pi$  powinna maksymalizować licznosc zbiorów  $Des_\pi^{\min}(y)$  i  $Chn_\pi(y)$ . Relacja ta powinna zapewniać brak pętli w łańcuchu  $Chn_\pi(y)$  i powinna być skierowana (directed). Ponadto jest to relacja ścisłego porządku (strict order) na zbiorze akcji  $Des_\pi(y)$ . Relacja ta nie dzieli zbioru  $Des_\pi(y)$  a w rezultacie otrzymuje się liniowo uprządkowany łańcuch  $Chn_\pi(y)$ .



Rys <sup>10</sup>. 1 (Fig. 1.  $Des_\pi(y)$  area in WSN, Directed cooperation in multi-hop...).

Ze względu na ograniczony zasięg komunikacji pojedynczego węzła, mniejszy od wielkości WSN, relacja podporządkowania  $\pi$  nie jest nigdy globalna. Natomiast, iloraz intensywności w sieci multi-hop

<sup>10</sup> W tym punkcie rysunki i tabele opisywane są według reguły: najpierw kolejny numer rysunku, dalej numer rysunku i jego opis z omawianej pracy zgodnie z listą prac (1 do 4) w p. 3.2.3 C (3. Nikodem Jan, Klempous Ryszard, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: *Directed cooperation in multihop wireless sensors network. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2010, vol. 56, nr 1, s. 7-11.*), W nawiasie podany jest skrót tytułu tej pracy.



dotyczący relacji  $\pi$ , jest raczej niski. Jednak, jeśli weźmiemy pod uwagę iloraz w otoczeniu sąsiednich węzłów, to zakres możliwych wartości jest znacznie powiększony.

### 3.3.3.5.2 Współpraca sąsiednich węzłów

Współpraca jest kluczową działalnością w sieciach multi-hop [Z. Chaczko, P. Moses, C. Chiu M, *Cooperative EKM for Wireless Sensor Networks, 12th Int. Conf. on Computer Aided Systems Theory, February 15-20, 2009, Las Palmas de Gran Canaria, Canary Islands, Spain; M. Welsh, G. Mainland, Programming Sensor Networks Using Abstract Regions, First USENIX/ACM Symp. on Networked Systems Design and Implementation, (NSDI'04) March 2004*]. Większość węzłów nie ma możliwości bezpośredniej komunikacji ze stacją bazową (BS), ponieważ jest poza zasięgiem łączności radiowej węzła. Elementy WSN są realnie rozmieszczone, węzły te dostarczają niezbędnych danych, komunikują się ze sobą wzajemnie w pewnym otoczeniu i zapewniają sprawność całej sieci. Istnieje wiele algorytmów WSN, które wykorzystują pewne własności sąsiedztwa/otoczenia (np. algorytm multi-hop, niezawodny, dwukierunkowy lub geograficzny). Dlatego wykorzystuje się definicję sąsiedztwa jak uprzednio (p wzory (17) – (24)). Zdefiniujmy Map (X, Y) jako zbiór funkcji mapowania z X na Y (surjection). Gdzie Sub(X) jest określona jako rodzina wszystkich podzbiorów X. Sąsiedztwa N definiujemy następująco

$$N \in \text{Map}(\text{Nodes}, \text{Sub}(\text{Nodes})) \quad (1)$$

Zatem, N(k) jest sąsiedztwem węzła k definiowane jako:

$$N(k) = \{y \mid y \in \text{Nodes} \wedge y \eta k\} \quad (2)$$

a N(S) jest sąsiedztwem S (zbioru węzłów

$$N(S) = \{y \mid y \in \text{Nodes} \wedge (\exists x \in S \mid x \eta y)\} \quad (3)$$

Oczywiście  $k, S \in \text{Nodes}$  a  $\eta$  jest relacją sąsiedztwa.

W pracy [J. Nikodem, *Designing Communication Space in Wireless Sensor Network Based on Relational Attempt, EUROCAST'2009, 12 International Conference on Computer Aided Systems Theory and Technology, in: Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009*] analizuje się różne definicje lokalności (rejonów- localities), które mogą być zaletami lub wadami podziału sieci na klastry, pojedyncze ścieżki routingu i sąsiedztwo. Lokalność naturalna jest wygodnym narzędziem do współpracy z sąsiedztwem, które jest określane przez naturalne (głównie techniczne) ograniczenia, jak np. zasięg łącza radiowego. Natomiast klasteryzacja jest formą uproszczenia, które równocześnie umożliwia obliczanie i redukcję zbioru możliwych rozwiązań w tym samym czasie. W rezultacie lokalność naturalną uważa się za najbardziej odpowiednią formę zasięgu lokalnego. Dysponując dobrze określonym sąsiedztwem one-hop dekomponuje się zdefiniowany globalnie łańcuch  $Des_{\pi}(y)$  na identyczne lokalne zadania przypisane do każdego węzła. Po zapoczątkowaniu tworzenia WSN, w trakcie procesu samoorganizacji, wyznacza się odległość między węzłami a BS, wyrażoną przez liczbę hop-ów niezbędnych do osiągnięcia BS. Procedura ta rozpoczyna się wysłaniem wiadomości z BS 'mój status: 0 hop-ów do BS'. Każdy węzeł, do którego dotrze wiadomość 'mój status: X hopów do BS' po raz pierwszy określa swój status jako 'X+1 hop-ów do BS i wysyła wiadomość 'mój status: (X+1) hop-ów do BS'. Po zakończeniu tej procedury, każdy węzeł ze statusem X+1 może komunikować się przynajmniej z jednym węzłem o statusie X. W efekcie, każdy węzeł k 'zna' swoją hop-ową odległość od BS -  $dis^h(k)$ . Znane są również odległości wszystkich sąsiadów  $dis^h(i)$ . ( $i \in N(k)$ ). Ilustruje to Rys. 2. Wykorzystując tę informację, możliwe jest rozdzielenie sąsiedztwa N(k) na trzy zbiory:

$$N < (k) = \{y \in N(k) \mid dis^h(y) < dis^h(k)\} \quad (4)$$

$$N = (k) = \{y \in N(k), y \neq k \mid dis^h(y) = dis^h(k)\}$$

$$N > (k) = \{y \in N(k) \mid dis^h(y) > dis^h(k)\}$$

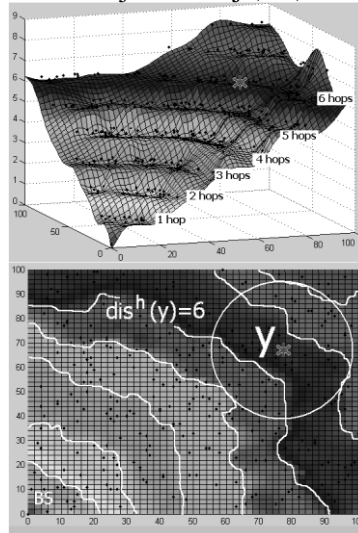
Zbiory te są parami rozłączne, wspólnie pokrywają zbiór N(k), z uwagi na:

$$(\exists k \in \text{WSN})(N < (k) = \emptyset \vee N > (k) = \emptyset \vee N = (k) = \emptyset) \quad (5)$$

Rozpatrzmy teraz relację podporządkowania  $\pi$ . Aktywność węzła  $k \in Des_{\pi}(y)$  w sąsiedztwie jest ograniczona do:

$$N_{\pi}(k) = \{y \in N(k) \mid y\pi k\} \quad (6)$$

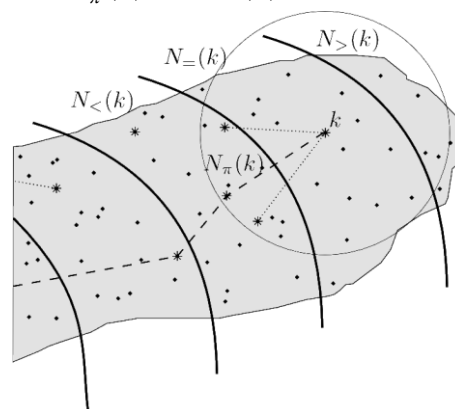
Znajomość zbioru  $N < (k)$  pozwala na wyznaczenie dla węzła elementów zbioru (25) w celu utrzymania kierunku przepływu danych do stacji bazowej (BS).



Rys. 2 (Fig. 2. Distance from BS(0,0) (measured in hops) and dish() zones, Directed cooperation in multi-hop...).

Sąsiedztwo należące do zbioru  $N_{\pi}(k)$  zostało wybrane ze zbioru  $N < (k)$  tak, że zbiór  $N_{\pi}(k)$  składa się z pewnych węzłów  $i \in N < (k)$ . To implikuje (Rys.3) zawieranie się zbioru  $N_{\pi}(k)$  w zbiorze  $N < (k)$ .

$$N_{\pi}(k) \subset N < (k) \quad (7)$$



Rys.3 (Fig. 3. Building Chn(k) element within neighborhood, Directed cooperation in multi-hop...).

Liczne algorytmy komunikacyjne i routingu WSN zorientowane są energetycznie lub na klasteryzację z bardzo rzadką zmianą sąsiedztwa/otoczenia. Proponuje się również współpracę węzłów w obrębie sąsiedztwa/otoczeniu, ale zamiast użycia CH do transmisji danych, wykorzystuje się koncepcję bezpośredniej współpracy. Takie elastyczne podejście zawiera w sobie wiele wyrafinowanych algorytmów rozproszonych odpowiednich do analiz. Wszelkie decyzje i działania, które są podejmowane w WSN, są faktycznie wykonywane przez węzły na podstawie informacji o ich otoczeniu (sąsiedztwie). Podejście relacyjne zapewnia zgodność działania lokalnego węzła z globalnie zdefiniowanymi wymaganiami, jaką jest ukierunkowana współpraca (directed cooperation). Aby spełnić ten globalny wymóg, każdy węzeł sieci gromadzi wszelkie informacje, które umożliwiają dostosowanie przepływu transmisji w preferowanym kierunku. Proponowane tu odległości Hop oraz relacje zapewniają, że całość komunikacji jest kierowana do stacji bazowej. Występuje wiele ścieżek routingu z danego węzła do BS. Jeżeli jest to konieczne, niektóre węzły mogą być wyłączone z routingu.

### 3.3.3.6 Omówienie uzyskanych wyników związanych z Analizą metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN)

Badania związane z analizą, modelowaniem i symulacją Bezprzewodowych Sieci Czujników (Wireless Sensors Networks - WSN) rozpoczęto w ramach współpracy z UA (University of Arizona, Tucson) oraz UTS (University of Technology, Sydney) na początku tego wieku. Korzystając z doświadczenia uzyskanego przy realizacji projektu „24/7 Software development ...”, realizowano wspólnie projekt „An improvement of energy aware routing wireless sensors network”. Współpraca ta jest kontynuowana. Efektem tej współpracy są liczne prace, rozdziały w książkach, referaty na konferencjach. Opracowano metodologię, zbudowano aparat formalnego opisu zachowań i modelowania działań w WSN. Dokonano oceny badanych algorytmów komunikacji w sieciach. W oparciu o opracowane modele formalne zaprojektowano algorytmy podstawowych działań w sieciach WSN. Dokonywano modyfikacji algorytmów klasteryzacji (clustering), routingu, śledzenia (tracking) i lokalizacji (localization). Zaproponowano relacyjne, zamiast funkcyjnego, podejście do zagadnienia routingu. Uwzględniono wymóg bezpiecznej komunikacji - poufności i autentyczności. Rozpatrywano zagadnienia współpracy elementów systemu WSN (distributed collaboration) oraz zdolności adaptacyjne sieci i jej odporność na przypadkowe i intencjonalne zaburzenia zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne. Efektem końcowym badań są propozycje algorytmów i protokołów dla WSN oraz badania ich możliwości zastosowania w rzeczywistych sieciach. Modelowana sieć składa się z rozproszonych ośrodków decyzyjnych i autonomicznych elementów lokalnych. Wprowadzano mechanizmy samoorganizacji, aby zapobiec rozpadowi systemu. W oparciu o uzyskane wyniki teoretyczne zaprojektowano i wykonano symulator sieci. Wykonano też odpowiednie eksperymenty obliczeniowe.

Mój wkład w badania był związany z następującymi zagadnieniami:

- modelowania współpracy elementów sieci w aspekcie działań rozproszonych oraz określania poziomów autonomii i zasięgów lokalności zdarzeń.
- ustanawiania bezpiecznego kanału komunikacyjnego oraz niezawodnego przesyłania informacji pomiędzy węzłami sieci.
- analizie podejścia relacyjnego, zamiast funkcyjnego, w celu poprawy efektywności (wydatku energetycznego i niezawodności) WSN.
- Oprócz analiz teoretycznych, obejmujących oszacowania poboru mocy, złożoność implementacyjną, pamięciową i wymagania komunikacyjne, przeprowadziłem praktyczną implementację i weryfikację proponowanych algorytmów.
- Zaangażowany byłem również w:
- symulację wybranych zachowań węzłów sieci z uwzględnieniem adaptacyjności i samoorganizacji.
- implementację opracowanych modeli i algorytmów w środowisku symulatorów opracowanych w ramach przeprowadzonych badań.
- publikacje z zakresu adaptacyjności i samoorganizacji oraz bezpieczeństwa i ochrony komunikacji w bezprzewodowych sieciach czujników.

Udział w zagadnieniach modelowania procesów komunikacyjnych w bezprzewodowych sieciach czujników polegał na:

- analizie możliwości zapewnienia niezawodnej funkcjonalnie komunikacji (dependability) pomiędzy poszczególnymi elementami sieci niezależnie od ich lokalizacji. Do analizy warunków ich funkcjonalności zostały wykorzystane rezultaty uzyskane w ramach: optymalizacji routingu w sieciach komputerowych, sieciach ad hoc oraz na wykorzystaniu adaptacyjnych metod minimalizacji zużycia energii na cele komunikacyjne;
- badaniu możliwości zarządzania siecią czujników oraz zapewnienie niezawodności poprzez dokładanie nowych i usuwanie zbędnych lub niepoprawnie działających czujników.
- określeniu ścieżki komunikacji i przesyłania danych pomiędzy poszczególnymi czujnikami i stacją bazową (BS), przy wykorzystaniu struktury logicznej sieci. BS jest głównym węzłem sieci odpowiedzialnym za gromadzenie danych. Tworząc takie ścieżki, dąży się do minimalizacji liczby komunikatów przesyłanych w sieci.

Badalem sposoby lokalizacji w 2D węzłów WSN w oparciu o trzy metody: ToA, AoA oraz RSS). Zaproponowano algorytm dedykowany sieci czujników bezprzewodowych losowo rozmieszczonych w pewnym obszarze. W zrealizowanym rozwiązaniu funkcję stacji bazowej przeniesiono do każdego

czujnika. Pozycje węzłów były określane na podstawie odległości do trzech innych węzłów o znanych pozycjach. Odległości były szacowane wykorzystując dowolną, możliwą metodę, na przykład RSS lub ToA. Przedstawiono wyniki symulacji pokazujące sposób, w jaki parametry algorytmu wpływają na błędne szacowania położenia węzła. Zoptymalizowano algorytm wyboru trzech sensorów używanych do lokalizowania innych czujników. Efektywność tego algorytmu była konkurencyjną w porównaniu do metod wykorzystujących n. p. rozmieszczenie BS w narożnikach obszaru.

Zajmowałem się również metodami wyznaczania tras komunikacyjnych. Zaproponowano algorytm znacznie zmniejszający zjawisko "popularności" węzłów. Zwiększało to czas, po którym proces klasteryzacji powinien być powtórnie wywołany. Reclustering jest gwarancją, że koszty utworzenia CH będą dzielone pomiędzy wszystkie węzły. Zaproponowany Algorytm zwiększa żywotność sieci poprzez zminimalizowanie poboru mocy przez najbliższy czujnik. Zmniejszenie "popularności" węzłów sprawia, że cała sieć czujników jest bardziej bezpieczna i odporna na błędy i uszkodzenia czujników. Wykorzystano symulacje umożliwiające przetestowanie prezentowane algorytmów i wykazanie ich właściwości.

Analizowałem również relacyjne podejście do modelowania zachowania bezprzewodowej sieci sensorów (WSN). Model opiera się na relacjach, które pozwalają na przedstawianie globalnie określonych celów sieci, a także na opisanie działania jednego węzła. Wykorzystuje się trzy relacje (podporządkowanie, tolerancji i kolizji) do modelowania komunikacji i sterowaniem ścieżek routingu. Ścieżki te są używane do przesyłania wiadomości od źródła do stacji bazowej. Chociaż najlepsza konfiguracja parametrów relacji nie jest jeszcze znana, symulacje pokazują, że dostosowanie intensywności relacji umożliwia sterowanie poborem mocy i wydłuża żywotność sieci. Polepszenie to wynika z faktu, że każdy węzeł sieci może adoptować swoje działania zgodnie z aktualną sytuacją w jego otoczeniu, a nie ściśle według pewnego predefiniowanego algorytmu routingu. Podejście to jest również bardziej ogólne niż algorytmy routingu prezentowane do uprzednio. Z powodu ograniczonego zasięgu łącza radiowego tylko niektóre węzły mają bezpośredni kontakt ze stacją bazową (BS). Transmisja odbywa się trybie multihop, a informacje są przesyłane z jednego węzła do drugiego w kierunku BS. Proponuje się relację podporządkowania  $\pi$  oznaczającą współpracę między węzłami i uwzględniającą własności topologiczne sieci.

Analizowałem też komunikację przestrzenną mającą zdecydowaną przewagę nad komunikację opartą na ścieżkach transmisji. Celem było skonstruowanie wielokrotnych ścieżek komunikacyjnych w kierunku BS, poprzez które będzie przesyłana informacja. Budowa ścieżek jest oparta na lokalnej informacji zebranej przez węzeł, który otrzymał wiadomość. Opierając się na tej wiedzy, węzeł decyduje, gdzie należy dalej przekazać wiadomość. Umożliwia to dzielenie kosztów komunikacji pomiędzy wiele ścieżek komunikacyjnych oraz węzły. Ponadto, zwiększa odporność i bezpieczeństwo sieci, ponieważ ścieżka komunikacji może być zmieniona w przypadku zakłóceń lub przechwycenia węzła.

Zakłada się, że węzły współpracując lokalnie w sąsiedztwie, wykorzystują lokalne kryteria i podejmują lokalne decyzje. Problemem stają się kryteria lokalnej optymalizacji, które powinny zapewnić, że wyznaczona ścieżka komunikacji przestrzennej spełnia kryteria określone w skali globalnej. Kooperacja (współpraca) oparta na relacji między węzłami wykorzystuje właściwości topologii sieci, a nie jest skierowana do konkretnego kierunku - węzły po prostu współpracują w sąsiedztwie. Jednakże cel WSN polega na zbieraniu informacji od sensorów i przesyłaniu jej do BS. Zatem węzły, które działają w sąsiedztwie muszą zapewnić, w oparciu podejmowane lokalnie decyzje, że mogą ustalać ścieżki routingu multihop dla węzłów sieci w kierunku BS. Proponuje się również współpracę węzłów w obrębie sąsiedztwie/otoczeniu, ale zamiast użycia CH do transmisji danych, wykorzystuje się koncepcję bezpośredniej współpracy. Takie elastyczne podejście zawiera w sobie wiele wyrafinowanych algorytmów rozproszonych odpowiednich do analiz. Wszelkie decyzje i działania, które są podejmowane w WSN są faktycznie wykonywane przez węzły na podstawie informacji o ich otoczeniu (sąsiedztwie). Podejście relacyjne zapewnia zgodność działania lokalnego węzła z globalnie zdefiniowanymi wymaganiami, jaką jest ukierunkowana współpraca (directed cooperation). Aby spełnić ten globalny wymóg, każdy węzeł sieci gromadzi wszelkie informacje, które umożliwiają dostosowanie przepływu transmisji w preferowanym kierunku. Proponowane tu odległości Hop oraz relacje zapewniają, że całość komunikacji jest kierowana do stacji bazowej.

Oprócz przedstawionych i omówionych zagadnieniami w wymienionych czterech pracach, zajmowałem się jeszcze innymi problemami związanymi z WSN.

## **W rozdziale**

Nikodem Jan, Chaczko Zenon, Nikodem Maciej, **Klempous Ryszard**: *Smart and cooperative neighbourhood for spatial routing in wireless sensor networks. Aspects of computational intelligence: theory and applications*, Ladislav Madarász, Jozef Živčák eds. Berlin ; Heidelberg : Springer, cop. 2013. s. 167-184, (*Topics in Intelligent Engineering and Informatics*; ISSN 2193-9411, 2): <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30668-6> definiując pojęcie routingu przestrzennego, można rozwijać zasady inteligentnego (smart) sąsiedztwa w celu przekazywania danych w dynamicznym i zmieniającym się środowisku. Najciekawszym aspektem proponowanej koncepcji inteligentnego sąsiedztwa jest obsługa pewnej postaci stygmergii (stygmergia - pośredni sposób porozumiewania się poprzez zmiany środowiska, np. poprzez pozostawianie feromonów), która pozwala na elastyczność zachowań sąsiedztwa w WSN. Ścieżki routingu w sieci dostosowując się do poziomu zakłóceń tym samym unikając obszarów o zwiększonym poziomie zakłóceń. Za pomocą Link Quality Indicator (wskaźnik jakości) parametrów, możliwy jest wybór kolejnego najlepszego transmittera. Pozwala to na dostosowanie proponowanego wyboru do poziomu zakłóceń, a więc ominięcie obszaru zakłóceń. Gwarantuje to udaną transmisję nawet w najbardziej niekorzystnych warunkach środowiskowych.

## **W poniższym rozdziale**

Nikodem Jan, Chaczko Zenon, Nikodem Maciej, **Klempous Ryszard**, Wickramasooriya Ruckshan: *Combating security threats via immunity and adaptability in cognitive radio networks. W: Recent advances in intelligent engineering systems / János Fodor, Ryszard Klempous, Carmen Paz Suárez Araujo (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. s. 221-242, (Studies in Computational Intelligence; ISSN 1860-949X, vol. 378): <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23229-9> zajmowano się aspektami bezpieczeństwa, odporności i zdolności adaptacji sieci Cognitive Radio (CR). Modelowanie działania sieci CR za pomocą podejścia relacyjnego umożliwiło dokładne opisanie złożonych cech interakcji sieciowych. Dzięki strategii globalnej sieci, każdy węzeł ma odpowiednie poziomy odporności i adaptacji, które gwarantują wystarczający poziom usług komunikacyjnych. Zarządzanie złożonym systemem w takim środowisku zwiększa zarówno zdolności adaptacyjne sieci i jej odporność.*

### **Model relacyjny w pracy**

**Klempous Ryszard**, *Collective behavior in Wireless Sensor Network., Acta Polytechnica Hungarica. 2014, vol. 11, nr 4, s. 101-118* znacznie ułatwia analizę zagadnień adaptacyjnych w sieciach WSN. W celu modelowania aktywności adaptacyjnej WSN wykorzystano podejście relacyjne korzystając z takich pojęcia podstawowych jak działania i zachowania. Model relacyjny zawiera w sobie nie tylko dotychczasowe rozwiązania w zakresie komunikacji tras (routingu), ale pozwala również osiągnąć cele globalne poprzez działania lokalne podejmowane przez poszczególne węzły sieci WSN. Relacyjne podejście zapewnia dobrą prezentację dla adaptacyjnego zachowania zbiorowego w WSN. Dobra jakość tego narzędzia wynika głównie z faktu, że umożliwia spójne modelowanie zjawisk globalnych i lokalnych. Lokalnie oznacza w tym podejściu w sąsiedztwie.

## **4. Aktywność naukowa**

Byłem intensywnie zaangażowany w organizację konferencji naukowych, odbyłem liczne staże naukowe na prestiżowych uczelniach, recenzowałem prace w czasopismach z listy filadelfijskiej. Zajmowałem się również edycją książek w wydawnictwach krajowych i zagranicznych, uczestniczyłem w realizacji wielu międzynarodowych projektów.

### **4.1. Udział w konferencjach naukowych**

W ostatnim okresie brałem czynny udział w licznych konferencjach, między innymi: Computer Aided Systems Eurocast, Hiszpania 2007, 2009, 2011, 2013; International Symposium on Logistics and Industrial Informatics LINDI, Linz, Austria, 2009, IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems INES, Hiszpania, 2010, Słowacja, 2011, Portugalia 2012. Uczestniczyłem w pracach komitetów organizacyjnych wielu konferencji naukowych. Przewodniczyłem sesjom na tych konferencjach oraz byłem współedytorem materiałów konferencyjnych. W ostatnich latach uczestniczyłem aktywnie w następujących konferencjach obsługiwanych przez system EasyChair:

1. Engineering of Computer Based Systems (ECBS 09), ECBS 2010, ECBS 2011, ECBS 2012, PC member, author.

2. Engineering of Computer Based Systems - Eastern European Regional Conference (ECBS-EERC 09), ECBS-EERC 2011, ECBS-EERC 2013, PC member.
3. Ibero-American Conference on Artificial Intelligence IBERAMIA 2010: PC member.
4. Asia Pacific Conference on Computer Aided System Theory (IEEE APCast'12): chair, author, proceedings author.
5. International Conference on Intelligent Engineering Systems, INES 2010, INES 2011, INES 2012: PC member, author.
6. International Symposium on Logistics and Industrial Informatics - LINDI 2009: PC member, author.
7. Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI-2011, MICAI 2008, MICAI-2007, MICAI-2006, MICAI-2005 PC member, author, proceedings author
8. 20.StudentConf 2010: PC member.
9. Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence & 4th International Workshop on Ambient Assisted Living, UCAmI & IWAAL 2012: PC member.

Od przeszło dziesięciu lat aktywnie współorganizowałem:

International Conference CASYS ON COMPUTING ANTICIPATORY SYSTEMS Liege, Belgium (<http://www2.ulg.ac.be/mathgen/CHAOS/news.htm>).

Jestem też od prawie dwudziestu lat aktywnym Program Committee Member International Conference on Computer Aided Systems Theory Eurocast Eurocast 2013 - IUCTC-Universidad de Las Palmas de Gran Canaria ([www.iuctc.ulpgc.es/spain/eurocast2013/](http://www.iuctc.ulpgc.es/spain/eurocast2013/)).

Na specjalną uwagę zasługuje mój udział w EURO XXI 2006, 21st European Conference on Operational Research, Reykjavik, Iceland, July 2-5, 2006 (<http://www.euro2006.org/>).

Na tej konferencji, spośród 1800 ogłoszonych referatów, na organizowanej przeze mnie Invited Session: Hierarchical models applications, został wyselekcjonowany referat: "Reference Governor Optimization and Control of a Distributed Solar Collector Field" (<http://www.euro2006.org/EuroFinalProgramme.pdf>), autorów :Cristina Rogelia Martinez Cirre, Loreto Valenzuela, Ryszard Klempous, Manuel Berenguel. Autorów zaproszono do przygotowania artykułu, jako jednego z dwunastu wybranych, do European Journal of Operational Research. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>.

Jest to też efekt mojej wieloletniej współpracy z Universidad de Almeria i Platforma Soalr de Almeria.

W roku 2013, oprócz konferencji Eurocast, współorganizowałem również konferencje:

- INES -17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Engineering Systems 2013 (INES 2013) June 19-21, 2013, Costa Rica;
- PACT 2013, Pan African Conference on Science, Computing and Telecommunications, Lusaka (2013), <http://www.ib2com.org/PACT>;
- IB2COM 2013 Guilin, China: 13 - 17 November,2013, <http://www.ib2com.org/>.

#### **4.2. Członkostwo w zespołach redakcyjnych czasopism, recenzje publikacji oraz recenzowanie kandydatów do ENI Award**

W ostatnich latach rozpocząłem współpracę z następującymi czasopismami:

1. International Journal of Electronics and Telecommunications, Polish Academy of Sciences, Committee of Electronics and Telecommunications; Editorial Advisory; Lista Ministerialna
2. Acta Polytechnica Hungarica Journal of Applied Sciences; Associate Editor; Lista filadelfijska
3. Technical Committee Member on Computational Cybernetics within System, Man and Cybernetics Society, IEEE, <http://www.ieeesmc.org/technical-activities/cybernetics/computational-cybernetics>

Jestem recenzentem artykułów w następujących czasopismach:

1. Computers and Mathematics with Applications (Elsevier).
2. Energy and Buildings (Elsevier).
3. Journal of Process Control (Elsevier).
4. Journal of Computational and Applied Mathematics (Elsevier).
5. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing (John Wiley).

Recenzowałem kandydatów do prestiżowej nagrody ENI (FONDAZIONE ENI ENRICO MATTEI).

Edytorstwo książek:

1. *Fodor János\** [Red.], **Klempous Ryszard** [Red.], *Suarez Araujo Carmen Paz\** [Red.]: *Recent advances in intelligent engineering systems / János Fodor, Ryszard Klempous, Carmen Paz Suárez Araujo (eds.). Berlin ; Springer, 2011. 439 s. rys., tab. (Studies in Computational Intelligence , ISSN 1860-949X; vol. 378) <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23229-9>*
2. *Chaczko Zenon\** [Red.], **Klempous Ryszard** [Red.], *Nikodem Jan* [Red.]: *Stealing time: explorations in 24/7 software engineering development / eds Zenon Chaczko, Ryszard Klempous, Jan Nikodem. Aalborg : River Publishers, cop. 2010. 171 s.*
3. *Klempous Ryszard* [Red.]: *Diversitas cybernetica / pod red. R. Klempousa. Warszawa : WKL, ISBN 832061595X, 9788320615951, 2005. 231 s.*
4. **Klempous, R.**, *Nikodem, J., Jacak, W., Chaczko, Z. (Eds.), Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence; Editors: Series: Topics in Intelligent Engineering and Informatics, Vol. 6 , 2014, XX, 408 p. 143 illus., ISBN 978-3-319-01436-4*
5. *4G Wireless Communication Networks: Design Planning and Applications; Editors: Johnson I Agbinya (La Trobe University, Melbourne, Australia) Mari Carmen Aguayo-Torres (University of Malaga, Spain), Ryszard Klempous (Wroclaw University of Technology, Poland), Jan Nikodem (Wroclaw University of Technology, Poland), River Publishers, 2010 ISBN: 978-87-92982-71-1*

W przygotowaniu kolejna pozycja z serii:

6. *Topics in Intelligent Engineering and Informatics (Springer Verlag): Innovative Technologies in Management and Science; Editors: R. Klempous, J. Nikodem; Przewidywany termin wydania: druga połowa 2014 r.*

### 4.3. Staże naukowe

Odbyłem liczne staże naukowe (łącznie czas trwania wszystkich – przeszło. 2 lata ). Dzięki temu nabyłem dużego doświadczenia naukowego i organizacyjnego (zestawienie to nie obejmuje pobytów w ramach programu Socrates/Erasmus).

Tabela 1. Staże naukowe w wiodących zagranicznych ośrodkach badawczych

Francja	Institute Mathematique Aplique de Grenoble	Visiting Researcher	16 tyg.	1984
Austria	Johannes Kepler University, Linz	Visiting Prof.	ok. 2 tyg. rocznie	Od 1994 do 2004
USA	University of Arizona, Department of Electrical and Computer Engineering, Tucson	Visiting Prof.	ok. 2 tyg. rocznie	Od 1999 do 2011,
USA	Bell Labs, Holmdel& Murray Hill, Multimedia Labs., NJ; University of Northern Arizona, Flagstaff, AZ, Rutgers University, Computational Biomedicine Imaging and Modeling Center, Piscataway, NJ	Visiting Researcher	2 tyg rocznie	1997 - 2000
		Visiting	2 tygodnie	1998 – 2005
		Visiting Prof Researcher	1 tydz/rok rocznie	1998 - 2003
Hiszpania	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Cybernetico Universidad de Almeria , Facultad de Informatica Universidad de Malaga, Facultad de Telecomunicacion	Visiting Prof.	2 tyg. rocznie	1994-2011
		Visiting Prof..	1 tydz. rocznie	1999 -2010
		Visiting Prof.	1 tydz. rocznie	2000 – 2011

#### 4.4. Udział w projektach badawczych

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych uczestniczyłem aktywny udział w licznych projektach badawczych, zarówno krajowych (projekty badawcze finansowane ze środków rządowych) jak i międzynarodowych.

Poniżej umieściłem listę najważniejszych:

##### Australia

*University of Technology, Sydney; Projekty:*

#### **1. 24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week.**

Realizacja oprogramowania 24/7 z wykorzystaniem technik IT: określenie zadań i narzędzi;

#### **An improvement of energy aware routing in WIRELESS SENSORS NETWORK.**

Poprawa routingu energii w bezprzewodowych sieciach czujników.

##### Austria:

*Johannes Kepler University, Linz*

*Fachhochschule Hagenberg, Projekty:*

#### **1. Assessment of the quality of teaching and learning based on data driven evaluation methods.**

Ocena jakości uczenia i nauczania wykorzystująca metody data mining.

#### **2. Modeling and application of intelligent peripheral systems in microsystems technology”**

Projekt Bilateralny polsko – austriacki; Czas trwania: od 2003 -- do grudnia 2004.

#### **3. Matrices of semiconductor gas sensors - the analysis of a matrix answer using neural networks or fuzzy logic.**

Projekt Bilateralny polsko-austriacki; Czas trwania: 2002 - 2003.

##### Hiszpania:

*Universidad de Las Palmas de Gran Canaria – od 1996r.*

#### **Assessment of the quality of teaching and learning based on data driven evaluation methods.**

Ocena jakości uczenia i nauczania wykorzystująca metody Data Mining.

*Universidad de Almeria – od 1998r.*

#### **1. Hierarchical control of a distributed solar collector field.**

Hierarchiczne sterowanie rozproszonymi systemami kolektorów słonecznych.

#### **2. Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field.**

Interakcyjna wielowymiarowa analiza danych otrzymywanych z systemu rozproszonych kolektorów słonecznych ( 2002 - 2004).

Projekty te były finansowane przez:

CICYT-FEDER funds (projects DPI2002-04375-C03 and DPI2004-07444-C04-04).

W oparciu o

“The specific collaboration agreement between the CIEMAT and the Automatic Control, Electronics and Robotics (TEP197) research group of the Universidad de Almeria entitled ”Development of control systems and tools for thermosolar plants”

#### **3. Improving Human Potential (IHP)) UE Project.**

Wykorzystanie technik Data Mining do analizy danych z instalacji słonecznych. Platforma Solar de Almeria, Hiszpania (2003 – 2004).

#### **4. Data Driven Analysis of Performance of Solar Plant Controllers under Disturbance Conditions”;**

Projekt Bilateralny ( polsko-hiszpański ); Czas trwania: od 004- do grudnia 2006.

##### USA:

*University of Arizona, Tucson od 1996r.*

#### **1. 24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week.**

Realizacja oprogramowania 24/7 z wykorzystaniem technik IT: określenie zadań i narzędzi.

#### **2. Models and methods for biometric motion identification.**

Metody i modele używane do biometrycznej identyfikacji ruchu.

#### **3. An improvement of energy aware routing wireless sensors network;***Northern University of Arizona, Flagstaff od 1998 r.*



4. **24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week.** *Rutgers University, Piscataway od 1998r.*
5. **Feasibility analysis of human motion identification using Motion Capture.** Metody identyfikacji ruchu ludzkiego przy użyciu technik Motion Capture.

**Niemcy:**

*Hochschule fur Wirtschaft und Technik, Drezno-1999r.*

**24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week.**

Realizacja oprogramowania 24/7 z wykorzystaniem technik IT: określenie zadań i narzędzi.

**Węgry:**

*Banki Donat Polytechnic(obecnie Obuda University), Budapeszt od 1999r.*

**1. Hierarchical control of a distributed solar collector field.**

Hierarchiczne sterowanie rozproszonymi systemami kolektorów słonecznych.

**Assessment of the quality of teaching and learning based on data driven evaluation methods.** Ocena jakości uczenia i nauczania wykorzystująca metody Data Mining.

Z ciekawszych, częściowo zrealizowanych projektów międzynarodowych należy wymienić:

**1. Politechnika Wroclawska, Ngee-Ann Politechnic, Singapore**

„Motion Captures Techniques”. Celem projektu były próby zastosowania technologii Motion Capture przy tworzeniu analitycznych modeli ruchu do zastosowań medycznych (1999 – 2002). Połączone to było z dwumiesięczną praktyką w naszym instytucie grupy studentów z **Ngee Ann Politechnic.**

**2. Politechnika Wroclawska, USA, Murray Hill, Bell Labs**

Metody i modele używane do biometrycznej identyfikacji ruchu. Projekt „TRAF”. Celem projektu było stworzenie systemu do modelowania ruchu, dzięki któremu użytkownik może wygenerować ruch z zarejestrowanej bazy ruchów bez dodatkowych kosztownych sesji „Motion Capture”(1999 – 2003).

**3. UM\_JEP 13370 „New Face of Central Administration and Education Processes”**  
TEMPUS UE Project. Entering the European Union- the New Face of the Central Administration of Education Process ( 1997 - 1998).

**4. Foresight - technologie medyczne** (zakończony w 2008), (Foresight numer WKP\_1/1/4/5/2/2006/12/15/593/2006)

Ekspert Zewnętrzny Narodowego Programu Foresight „Polska 2020”

Projekt dotyczył prognozy rozwoju sektora technologii medycznych w Polsce. Realizacja projektu została zakończona, a uzyskane wyniki podsumowano w opracowaniu pt. „*System monitorowania i scenariusze rozwoju technologii medycznych w Polsce*” wydanym przez konsorcjum ROTMED.

**5. QS World University Rankings® (<http://www.iu.qs.com/university-rankings/>).**

QS Intelligence Unit is at the forefront of developing and successfully implementing comparative data to highlight the relative strength of institutions.

Na szczególne podkreślenie zasługuje mój (od trzech lat) udział, jako eksperta, w tym światowym systemie ewaluacji szkół wyższych.

**6. Projekt Eureka E3324 - CHAMELEON: Software Development Project for Easy Control Platform Definition, Implementation and Common FPGA Technology Application for European Control System Manufactures** ( 2004 -2005)

Opracowanie i wdrożenie oprogramowania dla europejskich producentów systemów sterowania (sterowników), przeznaczonego do prostego konstruowania sterowników i powszechnego wykorzystania technologii FPGA.

**Projekty bieżące:**

**1. S40272 W4/I6 Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów**

Temat badawczy finansowany z dotacji na utrzymanie potencjału badawczego (dawniej badania statutowe) realizowany w Instytucie Informatyki, Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej. Termin rozpoczęcia lipiec 2012. Kierownik projektu.

**2. „Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku – modelowanie i monitoring zagrożeń”:**

Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, 2007-2013. Numer projektu POIG.01.03.01-02-002/08

3. „**Modelowanie i symulacja laparoskopowa**” w ramach **Laboratorium Programowania Interfejsów i Modelowania Procesów**. Kierownik projektu.  
Część raportów i sprawozdań w odniesieniu do tematyki badawczej przedstawiono w (p. **Załącznik 5**).

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W komputerowo wspomaganym procesie wspomagania decyzji i przetwarzania danych zajmowano się wykorzystaniem metod przetwarzania obrazów do modelowania wirtualnej rzeczywistości oraz zagadnieniami analizy np., procesów edukacyjnych, kierowania rozproszonymi zespołami projektowymi, zespołem koparek w kopalni odkrywkowej czy podstawowe problemy projektowania budynków inteligentnych

Łączna liczba publikacji w latach 1982 -2012 obejmuje **56** pozycji (p. **Załącznik 5.1., 5.2., 5.3.**) i obejmuje artykuły opublikowane w czasopiśmie z LF(**5**) oraz LM(**9**), referaty wygłoszone na konferencjach krajowych i zagranicznych (**33**).

W moim dorobku w tej dziedzinie znajduje się dziewięć (**9**) rozdziałów opublikowanych w książkach wydawnictw zagranicznych (np. Springer Verlag: Topics in Intelligent Engineering and Informatics, Studies in Computational Intelligence, River Publishers) jak i krajowych (WKŁ).

### 5.1 Efektywne metody przetwarzania obrazów wirtualnej rzeczywistości i technologii *Motion Capture (MoCap)*.

Ważnym elementem tych badań były wieloletnie kontakty z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi:

- 1) Multimedia Lab w Bell Labs Murray Hill, NJ, USA oraz Kinacity LLC, NJ, USA – współpraca z Jakubem Segenem w zakresie modelowania ruchu i systemów MoCap.
- 2) Rutgers University, NJ, USA – współpraca z Prof. Dimitrisem Metaxasem, szefem Computational Biomedicine Imaging and Modeling Center (wcześniej szefem Vision, Analysis and Simulation Technologies Laboratory, University of Pensylwania, Philadelphia, PA, USA) w zakresie zagadnień z obszaru rozpoznawania obrazów do zastosowań medycznych.
- 3) University of Arizona, AZ, USA – współpraca z Prof. Jerzym Rozeblitem, szefem Softwares Simulation and Information Systems Labs w zakresie modelowania systemów złożonych.
- 4) Uniwersytet w Linzu, Austria. Współpraca z F. Pichlerem i J. Scharingerem w zakresie modelowania systemów.
- 5) Polish-Japanese Institute of Information Technology, Warszawa, Bytom, Polska.

Współpraca z Markiem Kulbackim Dyrektorem Technicznym wielomodalnych laboratoriów ruchu:

- a) Human Motion Lab: Zaawansowane Wielomodalne Laboratorium Ruchu. Współpraca w zakresie wykrywania neurologiczno-motorycznych nieprawidłowości oraz porównywania wzorców ruchu osób, w szczególności chorych i zdrowych.
- b) Human Microexpression Lab - Laboratorium Mikroekspresji. Współpraca w zakresie wykorzystania wyników analizy ruchu w oparciu o psychologię społeczną, techniki biometryczne i inferencję postaci w 3D z wideo do identyfikacji incydentów i tworzenia materiałów dowodowych.
- c) Human Seeing Lab - Laboratorium Wizyjnej Analizy Ruchu. Współpraca w zakresie identyfikacji zachowań osób, detekcji sytuacji niebezpiecznych oraz analizy ruchu i zagrożeń na podstawie informacji o osobach i grupach przemieszczających się w polu widzenia setek kamer.
- d) Human Facial Modelling Lab - Laboratorium Komputerowego Modelowania Twarzy. Współpraca w zakresie wykorzystania wyników nowych metod wielorozdzielczej analizy twarzy.

Wykorzystanie technologii informatycznych do modelowania i przechwytywania ruchu (*Motion Capture – MoCap*) oraz skanowania postaci jest zagadnieniem aktualnym i ważnym. Celem badań było opracowanie algorytmów, budowanie modeli i badanie możliwości wykorzystania nowoczesnych technik przechwytywania i przetwarzania ruchów w wielu zagadnieniach praktycznych np. w

kryminalistyce, wielokryterialnej automatycznej identyfikacji postaci oraz w nowych technikach animacji ruchu. Wykorzystywane były technologie przechwytywania ruchu z żywych postaci, segmentacje dużych hierarchicznych zbiorów danych, multimedialne bazy danych służące do analizy, porównania i klasyfikacji ruchów.

Lista prac w tej tematyce obejmuje (25) pozycji (p. **Zał. 5.1**).

Zagadnienie identyfikacji osoby/postaci na podstawie ruchu postaci jest obecnie przedmiotem badań w liczących się ośrodkach badawczych na świecie. Wykorzystuje się tu możliwości analizowania w dziedzinie czasu i przestrzeni wyodrębnionych uprzednio cech ruchu postaci. Coraz więcej miejsc jest monitorowanych za pomocą kamer, zatem opracowanie metod rozróżniania osób stwarza zupełnie nowe możliwości identyfikacyjne.

Szerokie spektrum zastosowań technologii tworzenia analitycznych modeli ruchu uwidacznia się w różnorodności rozwijanych projektów. W USA, po wydarzeniach zaistniałych 11 września 2001r. duży nacisk kładzie się na implementację tych technologii w projektach obronnych. Jednym z nich jest projekt „Human ID at a distance” finansowany przez DARPA - komórkę Departamentu Obrony USA. Uczestniczące w nim zespoły m. in. z ośrodków Carnegie Mellon, Georgia Tech, MIT realizują projekt automatycznego rozpoznawania chodu w celu identyfikacji postaci ludzkiej na odległość.

W laboratorium Prof. Rozenblita, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, dokonuje się implementacji obronnych wzmiankowanych technologii. W Azji intensywnie rozwija się projekt CBAT (Center for Biometric Authentication and Testing) zainicjowany przez Chińską Akademię Nauk mający na celu wykorzystanie technik biometrycznych w celu zwiększenia bezpieczeństwa narodowego Chin, a także konkurencyjności chińskiej nauki na kreującym się właśnie rynku biometrycznych technologii. W Europie dokonuje się również wielu prób wykorzystania technik modelowania kształtu i ruchu postaci ludzkich do różnorodnych zastosowań. Jedną z takich inicjatyw jest projekt CAREN (Computer Assisted Rehabilitation Environments) rozwijany w Holandii przy udziale takich jednostek naukowych jak Akademia Medyczna w Amsterdamie, Uniwersytet w Groningen oraz firm z sektora informatycznego jak IBM. Dużym dorobkiem w dziedzinie identyfikacji osobniczej, poprzez analizę ruchu poszczycić się może zespół prof. M. Nixona z Southampton University. Jego system (w fazie testów i udoskonalen) charakteryzuje się dużym współczynnikiem trafnych identyfikacji.

Prowadzone badania miały na celu wykorzystanie nowoczesnych technologii informatycznych i elektronicznych do usprawnienia identyfikacji osób w oparciu o rejestracje kamer 2D.

Technika *Motion Capture* (*MoCap*) używa wyspecjalizowanego oprzyrządowania do rejestracji sekwencji ruchu w trzech wymiarach. Oprzyrządowanie to jest kosztowne, a sam proces rejestracji wymaga dużego wkładu pracy operatora, oraz ogranicza obiekt (osobę) wykonującą ruch przez użycie markerów, czujników, lub specjalnego ubioru. Korzystanie z *MoCap* w wielu sytuacjach jest przez to znacznie utrudnione lub wręcz niemożliwe, np. w pracy lekarza z pacjentem lub w zastosowaniach związanych z bezpieczeństwem, gdzie istnieje potrzeba rozpoznawania poruszających się postaci w czasie rzeczywistym bazując wyłącznie na materiałach wideo. W odróżnieniu od techniki *MoCap*, koszty i pracochłonność rejestracji przy stosowaniu kamer video (bez markerów) są niskie, a wykonawca ruchu nie jest fizycznie ograniczony i może nawet nie wiedzieć, że jego ruch jest rejestrowany i analizowany. Możliwość uzyskania opisu i modeli ruchu w trzech wymiarach przy użyciu zwykłych kamer, bez markerów, zwiększyłaby wielokrotnie przestrzeń praktycznych zastosowań. Problem jednak w tym, że rejestracja kamerami video daje bezpośrednio tylko sekwencje obrazów 2D. Przekształcenie takich sekwencji w trójwymiarowy opis ruchu, taki jaki uzyskuje się z *MoCap*, (sekwencji kątów stawów szkieletu) jest przedmiotem badań od kilkunastu lat, jednakże brakuje porównywalnych rezultatów praktycznych. Dość szeroko rozwinęła się rekonstrukcja 3D z obrazów kamer 2D przy użyciu metod stereowizji. Nie są to metody tak dokładne jak *MoCap* ani efektywne w przypadku analizy sceny poza laboratorium w czasie rzeczywistym.

Alternatywą do klasycznych metod wizji komputerowej inferencji 3D z 2D są metody obrazowania 3D w oparciu o pomiar odległości. Prym wiodą tu kosztowne kamery ToF (*Time of Flight*) o niewielkich rozdzielczościach oraz LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Nowe niskobudżetowe możliwości pojawiły się ostatnio w związku z wprowadzeniem przez firmę Microsoft kamery Kinect. W 2011 roku dzięki specjalnemu pakietowi Kinect for Windows SDK (Microsoft) użytkownicy otrzymali możliwość obsługi kontrolera z poziomu komputera wyposażonego w system operacyjny w wersji minimum Windows 7. Kontroler pozwala na śledzenie dwóch postaci jednocześnie. Estymowany szkielet postaci składa się z modelu 3D o 20 stawach. Każdy estymowany punkt sceny w swoim opisie zawiera wektor

opisujący jego położenie względem sensora. Choć Kinect został stworzony jako urządzenie peryferyjne konsoli do gier Xbox 360, jego podstawowym zadaniem jest rozpoznawanie i przetwarzanie ruchów człowieka dla gier video dedykowanych temu urządzeniu. Jednak Kinect nadaje się do celów naukowych jako tańszy zamiennik dla drogich systemów ToF i LIDAR oraz MoCap. Kinect potrafi rozpoznać sylwetkę człowieka czy gestykulację, dzięki informacjom o odległości we wszystkich punktach. Wadą Kinecta jest wykorzystanie światła strukturalnego, niewielka odległość efektywnego działania oraz sprzęt niezbędny do przetwarzania co czyni przykładowe rozwiązanie mało mobilnym.

Powstałe dzięki tej kamerze bazy danych wydają się być wystarczające do przeprowadzania eksperymentów np związanych z rozróżnianiem ruchu. Większe możliwości zapewniają kamery firmy Softkinetic (<http://www.softkinetic.com/>) umożliwiające uzyskanie danych 3D ruchu z większą dokładnością w pakiecie z oprogramowaniem iisu® Pro+DS325. Pierwsze eksperymenty są bardzo zachęcające.

Oprócz wymienionych zastosowań opracowana technologia, po modyfikacjach, przynosi znaczne korzyści w całych dziedzinach życia takich jak:

1. Medycyna – analiza postępu rehabilitacji człowieka po urazach i obiektywizacja oceny jego stanu.
2. Rozpoznawanie niepełnosprawności ruchowej i orzekanie inwalidztwa (wykrywanie symulantów i weryfikowanie orzeczeń wydawanych przez uprawnione instytucje).
3. Sport – ocena efektywności treningu sportowego i jego doskonalenie.

W wielomodalnych laboratoriach ruchu koordynowanych przez Marka Kulbackiego Polish-Japanese Institute of Information Technology, Warszawa, Bytom realizowane są duże projekty badawcze w ramach krajowych i międzynarodowych konsorcjów badawczych. Efekty badań wdrażają pilotażowo nie tylko współpracujące kliniki i szpitale w zakresie wyposażania w narzędzia do diagnostyki i rehabilitacji ale też studia graficzne i producenci gier komputerowych testują rozwiązania obniżające koszty i przyspieszające proces tworzenia realistycznych animacji postaci. Również służby w przemysłowych środowiskach monitoringu miejskiego testują autorskie rozwiązania inteligentnej analizy obrazu (Intelligent Video Analytics - IVA), ułatwiające automatyczne rozpoznawanie niebezpiecznych zachowań a także charakterystycznych cech ruchu poszczególnych osób. Instytucja opiera swoje rozwiązania na standardach przemysłowych, dzięki czemu są one użyteczne dla zainteresowanych kręgów odbiorców i nie wymagają zwykle dodatkowego dostosowania zewnętrznych danych.

Metodyka ta bazuje na dotychczasowych badaniach w dziedzinach rozpoznawania obrazów, systemów uczących się, śledzenia postaci w sekwencji video oraz analizy i rozpoznawania ruchów i gestów. Dotychczasowe doświadczenie weryfikowane byłom.inn. na danych uzyskanych z z firmy Credo Interactive Inc. (<http://www.charactermotion.com>). Firma ta dostarcza zarejestrowane zbiory ruchów 3D techniką *motion capture*.

Uzyskane rezultaty wyglądają zachęcająco. I tak, w pracy (p. **Załącznik 5.1**):

M. Kulbacki, B. Jablonski, **R. Klempous**, J. Segen „Multimodel Approach to Human Motion Designing”, *IEEE International Conference on Computational Cybernetics. ICC 2003, Proceedings of the International Conference on Computational Cybernetics, Siófok, Hungary, August 29-31, 2003* oraz w pracy

M. Kulbacki, **R. Klempous**, B. Jabłoński „Badania nad wykorzystaniem technologii Motion Capture do tworzenia realistycznych animacji postaci”, w „Systemy sterowania” red. W. Greblicki i C. Smutnicki, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa: zawarta została propozycja systemu, którego celem jest automatyczna synteza realistycznych postaci ludzkich. Na system ten składa się wiele modułów w szczególności do analizy, syntezy i przechowywania ruchów ludzkich. Zadaniem systemu jest tworzenie dowolnych sekwencji ruchów postaci ludzkiej na podstawie wymagań użytkownika oraz dostępnej bazy danych ruchów elementarnych.

W pracach

Kulbacki Marek, Rawicki Jacek, **Klempous Ryszard**, Segen Jakub, *Clustering methods for motion capture*”, *IEEE International Conference on Computational Cybernetics. ICC 2003. Proceedings ;Eds Imre J. Rudas, Aniko Szakal. Budapest Polytechnic. Siófok, Hungary, August 29-31, 2003;*

oraz

Jabłoński Bartosz, Kulbacki Marek, **Klempous Ryszard**, Segen Jakub: *Methods for comparison of animated motion generators*. W: *IEEE International Conference on Computational Cybernetics. ICC 2003. Proceedings*. Budapest Polytechnic, Siofok, Hungary, August 29-31, 2003 / Eds Imre J. Rudas, Aniko Szakal, 2003; zaproponowano zestaw metod niezbędnych do realizacji procesu porównywania ruchów ludzkich zapisanych w przestrzeni trójwymiarowej. Pokazano, że porównywanie ruchów ludzkich można traktować jako zadanie wielopoziomowe. Zaproponowano metody pozwalające na realizację tego zadania na każdym z wyodrębnionych poziomów ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki reprezentacji danych opisujących ruch.

Modelowanie ruchu postaci ludzkiej może być przeprowadzone za pomocą różnych reprezentacji danych.

W poniższej pracy:

M. Kulbacki, B. Jablonski, **R. Klempous**, J. Segen "Learning from Examples and Comparing Models of Human Motion", *Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics*, Fuji Press, 2004, Japan ;vol. 8 nr 5 s. 477-480 pokazano, że niektóre reprezentacje (translacyjne) są nieefektywne do rozwiązywania takich problemów. Zaproponowano metody pozwalające na skuteczny opis oraz porównywanie danych opisujących ruch (reprezentowane jako rotacje w przestrzeni trójwymiarowej). Porównywanie ruchów ludzkich nie może się ograniczać do prostego porównywanie pojedynczych klatek.

Uzyskane wyniki gwarantują, że analiza danych z eksperymentów uzyskanych z kamer 2D pozwoli weryfikować hipotezy identyfikacyjne osób na pożądanym poziomie. Dysponując doświadczeniem w tym zakresie, dzięki współpracy z Universidad de Almeria **R. Klempous et al.**: "Data analysis of a distributed solar collector field.". *Springer LNCS: Computer Aided Systems Theory; Volume Editors: Roberto Moreno-Díaz, Franz R. Pichler, Alexis Quesada-Arencibia* oraz *Maciejewski Henryk, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, Klempous Ryszard, Nikodem Jan: Badanie własności systemów generacji energii odnawialnej za pomocą technik OLAP i data mining, Inżynieria komputerowa. WKŁ 2005.*), wykorzystywano technologię *data mining* do przetwarzania podobnego volumenu danych.

W pracy:

Jabłoński Bartosz, **Klempous Ryszard**, Kulbacki Marek: *PDE-based filtering of motion sequences*. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2006, vol. 189, nr 1/2, s. 660-675, wykorzystano kwaterniony do filtracji szumu zarejestrowanego ruchu postaci.

W pracy:

**Ryszard Klempous**, *Surface Area Under the Motion Curve as a New Tool for Gait Recognition*, *Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2013, Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, Volume 8112, 2013, pp. 199-208*; analizowano często stosowane metody rozróżniania ruchu (chodu), takie jak The Dynamic Time Warping oraz Analizę Spektralną. Zaproponowano metodę porównywania powierzchni pod krzywą ruchu do identyfikacji ruchu (chodu).

Przetestowano i porównano wymienione metody z proponowaną w przypadku 1D. Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące.

W związku z uruchomionym przy Wydziale Elektroniki PWr laboratorium ViMed rozpoczęto z mojej inicjatywy prace związane z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości do budowy symulatora wspomagającego szkolenia chirurgów laparoskopowych:

Wytyczak-Partyka Andrzej, Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Rozenblit Jerzy, Klempous Radosław, Rudas Imre: *Safety oriented laparoscopic surgery training system*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2009, vol. 5717, s. 889-896

[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04772-5\\_114](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04772-5_114) praca zawiera opis systemu szkolenia chirurgów laparoskopowych, w którym szczególny nacisk położono na kwestie bezpieczeństwa pacjenta i kształtowanie odpowiednich zachowań chirurga - pozwalających na minimalizację ryzyka zabiegu. Przedstawiono propozycję konstrukcji systemu w oparciu o zdefiniowane a priori, trójwymiarowe pole operacyjne, w którym odpowiednio oznaczone zostały obszary szczególnie wrażliwe.

Wytyczak-Partyka Andrzej, Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Rozenblit Jerzy: *Surgical training system with a novel approach to human-computer interaction*, *Human-computer systems interaction: backgrounds and applications / Zdzisław S. Hippe, Juliusz L. Kulikowski (eds)*. Berlin ; Heidelberg : Springer, s. 383-393, *Advances in Intelligent and Soft Computing; ISSN 1867-5662, Volume 60, 2009, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-*

03202-8\_30, zaproponowano system szkolenia w zakresie chirurgii laparoskopowej. Omówiono nowe podejście do szkoleń, w których model 3D obiektu służy jako podstawa interakcji między użytkownikiem a systemem. Dokonano analizy stanu wiedzy, opisano główne elementy systemu jak również zarys zastosowanego algorytmu odzyskiwania 3D modelu

Wytyczak-Partyka Andrzej, Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**: *Application of structure-from-motion 3D reconstruction in computer-guided surgical training; Mastering the complexity of computer-based systems: 16th Annual IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer Based Systems, ECBS 2009: Proceedings, San Francisco, April 2009. Los Alamitos: IEEE Computer Society [Press], s. 287-290.* Przedstawiono system szkolenia w dziedzinie chirurgii laparoskopowej. Omówiono efekty stosowania algorytmów rekonstrukcji sceny 3D na podstawie obrazów z kamery do celów szkolenia operacyjnego. Kluczowym elementem systemu jest nowe podejście do szkoleń, w którym model 3D pola operacyjnego jest podstawą interakcji między ćwiczącym a systemem. Przedstawiono i omówiono zarys 3D algorytmu przetwarzania jak i wyniki.

Przemysław Sliwinski, Jerzy W. Rozenblit, Michael W. Marcellin, **Ryszard Klempous**: *Wavelet Amendment of Polynomial Models in Hammerstein Systems Identification. IEEE Trans. Automat. Contr. 54(4): 820-825 (2009),* zaproponowano zmodyfikowany algorytm on-line odzyskiwania nieliniowości w systemie dynamicznym. Algorytm został zaprojektowany w celu umożliwienia kalibracji w czasie rzeczywistym i kompensacji nieliniowych efektów w siłownikach (actuatorach). Postać on-line algorytmu pozwala na kompensację dryftu temperatury i starzenia się nie tylko w siłownikach, ale także w czujnikach (np. matrycach obrazowych CMOS lub CCD)

#### Praca

Wytyczak-Partyka Andrzej, Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Rozenblit Jerzy, Feng Chuan: *Computer-guided laparoscopic training with application of a fuzzy expert system. Lecture Notes in Computer Science. Lecture Notes in Artificial Intelligence. 2008, vol. 5317, s. 965-972, [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88636-5\\_91](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88636-5_91)* opisuje propozycje systemu ekspertowego wykorzystującego logikę rozmytą do oceny użytkownika korzystającego z symulatora ćwiczeń laparoskopowych. Przedstawiono metryki służące do pomiaru efektywności, z jaką użytkownik wykonuje zadania oraz propozycje interfejsu graficznego.

#### Praca

Wytyczak-Partyka Andrzej, Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Rozenblit Jerzy: *A novel interaction method for laparoscopic surgery training, Conference on Human System Interaction, Conference proceedings, Krakow, Poland, May 25-27, 2008. [Piscataway, NJ], IEEE: opisuje propozycje budowy symulatora do nauki zabiegów laparoskopowych opartego o trójwymiarowy model pola operacyjnego, zbudowany w oparciu o obrazy pochodzące z kamery laparoskopowej. Zaproponowano, aby na tak przygotowanym modelu umieszczać informacje o tzw. strefach zakazanych - w których nie powinny znajdować się instrumenty chirurgiczne w trakcie ćwiczeń czy operacji.*

#### W pracy

Klempous Radosław, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Wytyczak-Partyka Andrzej: *Wspomaganie szkolenia chirurgów laparoskopowych z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości; Komputerowe wspomaganie dydaktyki: materiały krajowej konferencji naukowej, Łódź, 25-27 czerwca 2008 / red. Edward Kącki, Joanna Stempczyńska. Łódź: Wyższa Szkoła Informatyki, 2008. s. 61-64: zaproponowano system symulatora laparoskopowego do szkolenia lekarzy chirurgów studentów medycyny wykorzystujący wirtualną rzeczywistość.*

Inna grupa zagadnień związana jest przetwarzaniem obrazów w celu ułatwienia diagnozy stanów nowotworowych.

Radlak Marcin, **Klempous Ryszard**: *Mass spectrometry diagnostic software for cancer detection - addressing geographical limitations. CASYS: International Journal of Computing Anticipatory Systems. 2008, vol. 21, s. 395-404.*

Radlak Marcin, **Klempous Ryszard**: *SELDI-TOF-MS pattern analysis for cancer detection as a base for diagnostic software. Lecture Notes in Computer Science. 2007, vol. 4827, s. 1132-1142. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-76631-5\\_108](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-76631-5_108),*

Uzyskane efekty wnoszą bardzo ważny wkład w rozwój wielu dziedzin jak na przykład: metod modelowania, identyfikacji i diagnostyki medycznej.

## 5.2. Procesy kierowania rozproszonymi zespołami projektowymi na przykładzie komputerowo wspomaganym procesów dydaktycznych.

W latach 1996 -2006 byłem Pełnomocnikiem Dziekana Wydziału Elektroniki ds. Komputeryzacji. Nadzorowałem System Zrządzenia Dydaktyką Merkury, który, obsługiwał 7 dziekanatów Politechniki Wrocławskiej (ok. 75% studentów – 25 tysięcy).

System wprowadzania danych wykorzystujący czytniki znaków optycznych (OPTICAL Mark Reader) został również wdrożony na Politechnice Warszawskiej i Szkole Głównej Handlowej (p. Załącznik 5.2) Opracowany system ankietowania studentów umożliwił tworzenie zaawansowanej bazy danych. Dzięki temu możliwa stała się analiza gromadzonych w długim okresie czasu danych w trybie on-line w oparciu o nowoczesne narzędzia informatyczne hurtowni danych OLAP (Online Analytical Processing czy DM – Data Mining).

Zrealizowano również analizę danych z uniwersytetów w Las Palmas, Linzu i Sydney oraz w Politechnice Warszawskiej / Wydział Elektroniki (p. Załącznik 5.2 poz. 7)

Zapoczątkowałem współdziałanie studentów i pracowników Wydziału Elektroniki PWr w Global Engineering College (GEC). GEC opiera się na wprowadzaniu elementów współpracy międzynarodowej studentów na każdym etapie kształcenia. Przygotowuje to przyszłych absolwentów do realizacji różnorodnych zadań, zarówno w zespołach regionalnych, jak międzynarodowych.

Istota GEC to cztery, połączone ze sobą, elementy: współpraca międzynarodowa, kursy językowe, wymiana międzynarodowa oraz Virtual Students Exchange (VSX).

Owocna współpraca międzynarodowa wymaga wypracowania wspólnych metod pracy i sposobów komunikacji, a temu właśnie ma służyć VSX. Zwiększenie efektywności w ramach VSX wynika z faktu, iż działanie to zachodzi na płaszczyźnie merytorycznej (a nie instytucjonalnej), a podmiotami tych działań są studenci i wykładowcy (a nie są to urzędnicy).

W ramach współpracy z Northern Arizona University (NAU) w Flagstaff oraz Dresden College of Applied Science (HTW) – w ramach zajęć prowadzonych na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej – przez trzy semestry realizowaliśmy projekt VSX, testując jednocześnie różne formy i narzędzia wspomagające jego realizację. Udział brali członkowie kół naukowych TRAF i BARAK.

Zaowocowała to wydaniem monografii:

*Zenon Chaczko, Ryszard Klempous and Jan Nikodem University of Technology, Sydney, Australia & University of Technology, Wrocław, Poland; Stealing Time Explorations in 24/7 Software Engineering Development; ISBN: 978-87-92329-42-4 ;The River Publishers Series in Signal,Image and Speech Processing .*

### **Omówienie tego projektu znalazło się na stronach Wall Street Journal:**

*Expanding the 24-Hour Workplace - WSJ.com*

*The Wall Street Journal Home Page*

*THE JOURNAL REPORT: BUSINESS INSIGHT*

*Global Business*

*Expanding the 24-Hour Workplace*

*Round-the-clock operations aren't just for call centers anymore*

*By AMAR GUPTA, University of Arizona*

*September 15, 2007; Page R9*

In 1914, Henry Ford introduced the concept of three eight-hour shifts to achieve round-the-clock assembly in an automobile factory. Today we are witnessing the advent of 24-hour knowledge factories. Spreading out across the globe with clusters of three or four facilities, each six to eight hours apart, was an idea first limited to 24-hour call centers and support staff for global communications networks. Now, thanks to more robust information technology and a growing acceptance of offshoring, the concept is feasible for a much broader range of work.

### **Gaining Momentum**

In a continuing experiment in which Multimind is being used to confirm the efficiency of so-called tri-site production, teams of students and faculty at **Poland's Wrocław University of Technology**; the University of Arizona, in Tucson; and the University of Technology in Sydney can all work on a single task, with each shift picking up where the previous one left off. Their work can then be compared with results from a similar task performed by a team at only one site. Results so far indicate that work is more efficient and faster when it is shared among the three teams.

Lista publikacji (p. 5.2.) związanych z tym zagadnieniem liczy 28 pozycji.

### 5.3. Wspomaganie procesu planowania pracy koparek w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego.

Opracowano model systemu planowania wydobycia w kopalni odkrywkowej węgla brunatnego.

W pracy:

**Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Kuliszewski Mieczysław:** *The linearised version of an algorithm for the mixed norm problem. Journal of Computational and Applied Mathematics. 1989 vol. 28, s. 237-247, LF, optymalizację wyznaczania pracy koparek sprowadzono do zagadnienia optymalizacji wielonormowej funkcji celu przy liniowych ograniczeniach.*

### 5.4. Wspomaganie procesu rozkroju surowca, sterowani a ruchem ulicznym i problemy metodologii i technologii planowania w budynkach inteligentnych.

Zajmowałem się komputerowo wspomaganymi procesami podejmowania decyzji przy optymalizacji rozkroju surowca i w budynkach inteligentnych.

W pracy:

**Klempous Ryszard, Kotowski Jerzy, Szlachcic Ewa:** *Interactive procedures in large scale two-dimensional cutting stock problems. Journal of Computational and Applied Mathematics. 1996, vol. 66, Jan, s. 323-331, LF, rozpatrywano zagadnienie optymalnego rozkroju surowca.*

W pracy:

**Czarczyński Wojciech, Klempous Ryszard, Nikodem Jan:** *Multilevel approach to traffic control system / Wojciech Czarczyński, Ryszard Klempous, Jan Nikodem. Springer-Verlag, 1997. s. 561-566, Lecture Notes in Computer Science, ISSN 0302-9743; vol. 133; <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0025075>, LF, analizowano wielopoziomowe podejście do sterowania ruchem ulicznym.*

W poniższych pracach analizowano problemy metodologii i technologii w budynkach inteligentnych.

W pracy

**Handzlik Adam, Jabłoński Andrzej, Klempous Ryszard, Skotarczyk Agnieszka:** *Task and resources assignment in special application embedded systems. Lecture Notes in Computer Science. 2012, vol. 6928, s. 203-208, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27579-1>; zaprezentowano problematykę projektowania i dostępu do narzędzi informatycznych, symulatorów, sprzętu i oprogramowania dla wszystkich funkcji, zadań, zasobów i interakcji potrzebnych do spełnienia wymagań konkretnego, specjalnego przeznaczenia, systemu wbudowanego. Wskazano na iteracyjny charakter doboru interfejsu HMI, co w warunkach szczególnych zastosowań, może prowadzić do jeszcze bardziej krytycznego planowania zasobów sprzętowych. Wskazano na konieczność optymalizacji systemu o ograniczonych zasobach.*

W pracy

**Jabłoński Andrzej, Klempous Ryszard, Licznarski Benedykt:** *Diversified approach to methodology and technology in distributed intelligent building systems; Roberto Moreno-Diaz, Franz Pichler (eds). Berlin: Springer, 174-184, (Lecture Notes in Computer Science, ISSN 0301-9743; vol. 2809) [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-45210-2\\_17](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-45210-2_17), LF; analizowano problemy metodologii i technologii w budynkach inteligentnych. Dokonano przeglądu i analizy struktur funkcjonalnych i komunikacyjnych stosowanych w automatyce budynkowej. Zaprezentowano podstawowe podsystemy funkcjonalne i przedstawiono model integracji systemowej. Poruszono zagadnienia metodologii przetwarzania informacji w budynkach inteligentnych. Omówiono cele, struktury i zadania integracji elementów automatyki budynków. Podkreślono uwarunkowania związane z optymalizacją działania systemów w budynkach inteligentnych.*

## 6. Osiągnięcia dydaktyczne

Prowadziłem wszystkie formy zajęć dydaktycznych związanych z Metodami i Algorytmami Optymalizacji, Symulacją i Modelowaniem, Analizą Numeryczną, Zastosowaniem Komputerów w Medycynie, Podstawami Automatyki, Teorią Systemów. Zajęcia te odbywały się zarówno na PWr jak i na innych uniwersytetach. Również w ramach programu Erasmus (dawniej Sokrates). Miałem wykłady na studiach podyplomowych i doktoranckich. Ostatnio na Wydziale Prawa Uniwersytetu Wrocławskiego i na Universidad de Almeria. Recenzowałem też prace doktorskie. Ostatnio na University of Technology Sydney. Byłem członkiem komisji egzaminacyjnych prac dyplomowych i



doktorskich (ostatnio Universidad de Almeria). Opiekowałem się przeszło 150 pracami dyplomowymi. Moi dyplomanci zdobyli dwa wyróżnienia i jedną drugą nagrodę w konkursach Polskiego Towarzystwa Informatycznego na najlepszą pracę dyplomową.

Od przeszło dziesięciu lat kieruję Laboratorium Programowania Interfejsów i Modelowania Procesów przy Instytucie Informatyki, Automatyki i Robotyki PWr. Laboratorium to od 2012 roku poszerzone zostało o Centrum Wirtualnych Technologii Medycznych *ViMed*. Rozpoczęto prace związane z aplikacjami najnowszych badań z zakresu informatyki, automatyki i robotyki w dziedzinie medycyny. Podstawowy cel to wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości do prowadzenia symulowanych operacji laparoskopowych.

Aktualny zakres działalności laboratorium:

- Bezprzewodowe Sieci Czujników (Wireless Sensors Networks – WSN).
- Modelowanie i symulacja laparoskopowa.
- Modelowanie i identyfikacja ruchu postaci.
- Międzynarodowe zespoły projektowe "7/24".
- Testowanie wydajności urządzeń drukujących.

W laboratorium realizowany był projekt w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007-2013, Priorytet 1. Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Działanie 1.3. Wsparcie projektów B+R realizowanych, na rzecz przedsiębiorców, przez jednostki naukowe, poddziałanie 1.3.1. Projekty rozwojowe: **Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku – modelowanie i monitoring zagrożeń.**

Laboratorium współpracuje m.in. z: University of Arizona, University of Technology Sydney, Northern Arizona University oraz firmami Laserton, Lambda, BlackPoint.

Wyposażone jest w aparaturę badawczą:

- Sieć węzłów wyposażonych w czujniki. Stacje zarządzania siecią typu MICA Gateway dla sieci WSN umożliwiające połączenie sieci bezprzewodowej czujników do komputera PC poprzez USB oraz sieć Ethernet. Zestawy te pracują pod systemem operacyjnym TinyOS i są programowalne w języku NesC.
- Stanowisko do symulacji zabiegów laparoskopowych, oparte na urządzeniu LapSim 2011 firmy Surgical Science, Szwecja. Stanowisko umożliwia wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości do prowadzenia symulowanych operacji – przy jego pomocy rozwijane są w laboratorium nowe metody interakcji Human-Machine. Studenci Akademii Medycznej we Wrocławiu odbywają zajęcia semestralne w ramach pogłębiania teorii i praktyki dotyczącej chirurgii laparoskopowej.

Jestem opiekunem dwóch Kół Naukowych Studentów przy Wydziale Elektroniki PWr:

**TRAF - BARAK.** Członkowie tych kół mają na swoim koncie liczne sukcesy, m.in. projekty realizowane w ramach Global Engineering College (GEC) umożliwiły wspólne realizacje wielu przedsięwzięć razem ze studentami uniwersytetów na innych kontynentach.

Global Engineering College zakłada kształcenie inżynierów w zespołach międzynarodowych, jako specjalistów, posiadających nie tylko tradycyjne umiejętności techniczne, ale potrafiących także realizować inne zadania. Inżynier powinien umieć być nie tylko pracownikiem czy kierownikiem projektu, ale powinien wykazywać także komunikatywność, umiejętności menedżerskie. Umieć wykazać się efektywnością współpracy z członkami zespołu, bez względu na ich kulturowe czy językowe pochodzenie.

W ramach współpracy z Northern Arizona University (NAU) w Flagstaff oraz Dresden College of Applied Science (HTW) – w ramach zajęć prowadzonych na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej – przez trzy semestry realizowaliśmy projekt VSX, testując jednocześnie różne formy i narzędzia wspomagające jego realizację. Udział brali członkowie kół naukowych TRAF i BARAK.

Staż studenckie w ramach GEC odbywały się w latach 2000 - 2008 w następujących ośrodkach: Rutgers University, NJ, USA –Computational Biomedicine Imaging and Modeling Center, Multimedia Lab w Bell Labs Murray Hill, NJ, USA) w zakresie modelowania ruchu postaci, University of Arizona, AZ, USA Softwares Simulation and Information Systems Labs w zakresie modelowania systemów wieloagentowych, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ w ramach Global Engineering College. Uczestniczyło w nich przeszło pięćdziesięciu studentów Wydziału Elektroniki PWr.

## WYKAZ REALIZOWANYCH PROJEKTÓW BADAWCZYCH I AKTYWNOŚCI W RAMACH KÓŁ NAUKOWYCH 'BARAK' I 'TRAF'

- 2004-2007 Virtual Students Exchange.** Międzynarodowe projekty studenckie z wykorzystaniem wideokonferencji. Northern Arizona University, Technische Hochschule Dresden. *USA, Niemcy*
- 2005-2007 Modelling and Control of Distributed Solar Collector Fields.** Modelowanie systemów generacji energii odnawialnej. Platforma Solar de Almeria, Universidad de Almeria, *Hiszpania*
- 2005-2008 Wireless Sensors Networks.** Modelowanie zachowań w bezprzewodowych sieciach czujników. University of Arizona, Tucson, University of Technology Sydney. *USA, Australia*
- 2005-2008 World-Wide Teams In Software Developments.** Międzynarodowe zespoły projektowe w standardzie 7/24. University of Arizona, Tucson, University of Technology Sydney. *USA, Australia*
- 2006-2008 Remote Laboratories Based on Internet Network.** Laboratoria Internetowe w procesie dydaktycznym. University of Technology Sydney. *USA, Australia.*
- 2006-2008 Virtual Assistant Surgical Training.** Wspomaganie szkolenia chirurgów laparoskopowych z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości. University of Arizona, Tucson. *USA*
- 2007 Digifoto -** warsztaty postprocesingu w fotografii cyfrowej i przetwarzaniu obrazu.algorytmów w środowisku symulatorów zrealizowanych w ramach badań.



- 2007 Apple World Wide Developer Conference.** Konferencja firmy Apple skierowana dla programistów, San Francisco, *USA.*
- 2007-2008 Google Summer of Code.** Udział studentów w programie stypendialnym Google Summer of Code.
- 2007-2008 Google Day na Politechnice Wrocławskiej.** Pomoc w organizacji spotkania z firmą Google.
- 2007-2008 any wielodotkowe, Open Academy.** Prace nad nowego rodzaju interfejsem human-computer, seminarium nt. ekranów wielodotkowych.

## 7. Aktywność międzynarodowa.

Sprawozdania ze współpracy międzynarodowej za rok 2012:

Imię: **Ryszard**  
Nazwisko: **Klempous**  
Wydział: **Wydział Elektroniki**  
Jednostka: **Instytut Informatyki, Automatyki i Robotyki**  
Raporty: **2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | **2012****

Wydrukuj sprawozdanie

Rodzaj współpracy

Współpraca w ramach umowy/programie międzynarodowym

Inne kontakty

**Lista instytucji:**

Kraj: **Austria**, instytucja: **Fachhochschule Hagenberg**

Kraj: **Portugalia**, instytucja: **University Nova of Lisbon**

Kraj: **Portugalia**, instytucja: **Instituto Superior Técnico**

Kraj: **Stany Zjednoczone**, instytucja: **Duke University**

Kraj: **Stany Zjednoczone**, instytucja: **North Carolina State University**

Kraj: **Stany Zjednoczone**, instytucja: **Princeton University**

Kraj: **Turcja**, instytucja: **Istanbul Technical University**

Kraj: **Węgry**, instytucja: **Óbuda University**

Efekty współpracy

Wspólne projekty naukowe

Wspólne projekty dydaktyczne

Wspólne publikacje, recenzje, komunikaty itp.

Udział w konferencjach międzynarodowych

Kraj: **Portugalia**, udział: **czynny**

Kraj: **Turcja**, udział: **czynny**

Wyjazdy za granicę poza konferencjami

Kraj: **Austria**, okres: **do 2 tygodni**, cel: **Dydaktyka**

Kraj: **Stany Zjednoczone**, okres: **do 2 tygodni**, cel: **Praca naukowo-badawcza**

Kraj: **Stany Zjednoczone**, okres: **do 2 tygodni**, cel: **Organizacyjny**

Kraj: **Węgry**, okres: **do 2 tygodni**, cel: **Inny** (Organizacja Konferencji, Konsultacje związane z decyzją pozycji książkowych w Springer Verlag)

Kraj: **Węgry**, okres: **do 2 tygodni**, cel: **Dydaktyka**

Sprawozdania z poszczególnych wyjazdów:

Kraj: **Austria** Cel: **Erasmus.Organizacyjny**. Jednostka przyjmująca: **Fachhochschule Hagenberg**  
Efekt: **Wykłady: Worldwide teams in software development. Toward the 24-hours knowledge factory. Redakcja książki: Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence, Springer**

Kraj: **Portugalia** Cel: **Udział w konferencji**. Jednostka przyjmująca: **New University Lisbon, Faculty of Sciences and Technology** Efekt: **Udział w 16th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems** Wygłoszenie referatu: **Application of B-splines in modelling anatomic shapes from CT scans.**

Kraj: **Portugalia** Cel: **Nawiązanie współpracy**. Jednostka przyjmująca: **Instituto Superior Técnico**. Efekt: **Omówienie rezultatów w zakresie: Spatial Routing in Wireless Sensors Network oraz Smart and Cooperative Neighborhood in Distributed Systems.**

Kraj: **Stany Zjednoczone** Cel: **Organizacyjny**. Jednostka przyjmująca: **Princeton University**. Efekt: **Wizyta w Princeton University, School of Engineering and Applied Science; Laboratorium: The PULSe (Princeton University Laser Sensing).**

Kraj: **Stany Zjednoczone** Cel: **Organizacyjny**. Jednostka przyjmująca: **Duke University**. Efekt: **Wizyta w Duke University; Electrical and Engineering Dept.**

Kraj: **Stany Zjednoczone** Cel: **IBM Cloud computing in higher education**. Jednostka przyjmująca: **North Carolina State University**. Efekt: **Organizacja współpracy w zakresie w**

zakresie Cloud computing in higher education Ustalenie warunkow wspoldzialania z IBM North Carolina Data Center i North Carolina State University.

Kraj: **Turcja** Cel: **Udzial w konferencji**. Jednostka przyjmujaca: **Istambul University of Technology. Bogazici University, Istanbul** Efekt: **Udzial w11th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training'** Wygloszenie referatu: **Group-work Teaching and Learning Involving 3 Time Zones (3TZ) Model of Collaboration in the Global Workspace.**

Kraj: **Węgry** Cel: **Erasmus.Organizacyjny**. Jednostka przyjmujaca: **Obuda University**. Efekt: **Wyklady: Worldwide teams in software development. Toward the 24-hours knowledge factory.** **Konsultacje zwiazane z redakcja ksiazki: Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence, Springer Verlag.**

Kraj: **Węgry** Cel: **Organizacyjny**. Jednostka przyjmujaca: **Obuda University**. Efekt: **Redakcja ksiazki: Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence, Springer Verlag.** **Robocze spotkanie zwiazane z organizacja konferencji INES 2013.**

**Sprawozdania z lat 2007 – 2014 dostepne sa na stronie:**

**<http://www.dwm.pwr.wroc.pl/reports/view.php?id=466&year=2012>**

W ostatnich latach podpisano umowy miedzynarodowe w ramach projektu Erasmus m.inn. z UNIVERSIDAD DE ALMERÍA, , UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA, UNIVERSIDAD DE JAÉN, DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (UNED), MADRID, DE MÁLAGA, DE LA LAGUNA TENERIFE, DE SALAMANCA, DE MURCIA, OBUDAI EGYETEM BUDAPEST, UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN. Umowy te sa aktualne do dzisiaj.

## **8. Inne osiągnięcia habilitanta.**

**Jest Honorowym Profesorem Obuda University (ÓBUDAI EGYETEM) w Budapeszcie.**

**Jest członkiem New York Academy of Science od 1992 r. oraz IEEE (Senior Member).**

**Współautorem patentu: P.29730404.01.1993 :Czujnik komputerowego miernika odległości i kątów przestrzennych w narządach i organach ciała (Measuring probe for a computer-based instruments for measuring distances and three-dimensional angles in body organs), PAT.170314, KLEMPOUS JAN, Wrocław / PL KLEMPOUS RYSZARD, Wrocław / PL NIKODEM JAN, Wrocław / PL MICHALSKI MARIAN, Wrocław / PL.**

**Współautor zgłoszenia patentowego:** Sposób i układ do adaptacyjnego wyznaczania drogi transmisji bezprzewodowej.

**Nagrody i wyróżnienia.**

Wielokrotne nagrody Rektora, Dziekana Wydziału oraz Dyrektora Instytutu na Politechnice Wrocławskiej.

Praca: Cirre Cristina M, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard:** Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field, została wybrana jako jedna z dwunastu spośród 1800 wygłoszonych referatów na konferencji *EURO XXI 2006, Reykjavik*, które ukazały się w *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>

Nagroda za najlepszy referat na konferencjach: International Conference CASYS on COMPUTING ANTICIPATORY SYSTEMS (Liege, 2007, 2011).

**Cytowania w zatwierdzonych patentach w USA:**

Patent 7321806 Issued on January 22, 2008. Estimated Expiration Date: February 17, 2026. Method and apparatus for placing parts in a bounded region, **Inventors:** Kapadi, Mangesh D., Palanisamy, Lingathurai, Shanmugavelu, Pragathieswaran; **Assignee:** Honeywell International Inc. **International Class; Other References:....** H. H. Yanasse et al., “Two-dimensional Cutting Stock with Multiple Stock Sizes”, *Journal of the Operational Research Society*, 42 pp. 673-683..... **R. Klempous et al.**, “Interactive procedures in large-scale two-dimensional cutting stock problems”, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 66 (1996) pp. 323-331.....

Patent 7610114 Issued on October 27, 2009. Estimated Expiration Date: November 28, 2025; Sheet material incorporating smaller areas defined by elongated slits and means of attachment enabling printing of said small areas while still attached but after slitting; **Inventors:** Kapadi, Mangesh D., Palanisamy, Lingathurai, Shanmugavelu, Pragathieswaran; **Assignee:** Honeywell International Inc.

**International Class; Other References:**... R. Klempous et al., "Interactive procedures in large-scale two-dimensional cutting stock problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics* 66 (1996) pp. 323-331. F. Vanderbeck, "A Nested Decomposition Approach to a Three-Stage, Two-Dimensional Cutting-Stock Problem", *Management Science* © 2001 Informs vol. 47, No. 6, Jun. 2001 pp. 864-879.

**Udział w zespołach eksperckich.**

**Foresight - technologie medyczne** (zakończony w 2008), (Foresight numer WKP\_1/1/4/5/2/2006/12/15/593/2006)

Projekt dotyczył prognozy rozwoju sektora technologii medycznych w Polsce.

**QS World University Rankings®** (<http://www.iu.qs.com/university-rankings/>).

Udział w światowym systemie ewaluacji szkół wyższych.

**Narodowe Centrum Nauki.**

Recenzowanie projektów.

## 9. PODSUMOWANIE

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych (1980r.) habilitant kontynuował prace związane z wieloma zagadnieniami z zakresu modelowania, symulacji i optymalizacji procesów. Najważniejsze z nich związane są z:

- rozwojem metod optymalizacji i symulacji w sieciach dystrybucji mediów (1981 – 2002),
- wykorzystaniem metod optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych (od 1999),
- badaniem metod lokalizacji i symulacji (od 2001) w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensor Networks).

Przedmiotem jego zainteresowań były również komputerowo wspomagane procesy wspomaganie decyzji oraz wykorzystanie metod przetwarzania danych.

Większość wykonywanych prac badawczych związana była z udziałem w projektach w ramach współpracy dwustronnej z Austrią, Hiszpanią oraz w innych projektach międzynarodowych (USA, Australia, Niemcy) jak również w projektach ministerialnych.

Wiele prac badawczych wiąże się z aktywnymi pobytami w zagranicznych ośrodkach badawczych, takich jak: Austria: Johannes Kepler University, Linz; USA: University of Arizona, Department of Electrical and Computer Engineering, Tucson; ASTEC Laboratory; Murray Hill, Bell Labs, Northern Arizona University (NAU), Flagstaff, AZ, Rutgers University, NJ; Hiszpania: Universidad de Malaga, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Universidad de Almeria; Australia: University of Technology Sydney.

Habilitant rozwija narzędzia oraz metody teoretyczne i praktyczne pozwalające na analizowanie i rozwiązywanie realistycznych problemów związanych z wieloma zagadnieniami z zakresu modelowania, symulacji i optymalizacji procesów. Dorobek naukowy habilitanta w latach 1971-2014 obejmuje ogółem 237 pozycje, w tym publikacji 162. Dorobek, po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w roku 1980, obejmuje łącznie 207 pozycji, w tym prac niepublikowanych 54. Liczba cytowań wg WOS – 74 (wg Scopus 87), a h- index – 4 (wg Scopus 6).

Spośród tych prac, 16 znajduje się w bazie Journal Citation Report (JCR). Są to następujące czasopisma: *Journal of Computational and Applied Mathematics* (6), *Mathematics and Computers in Simulation* (1), *European Journal of Operational Research* (1), *IEEE Transaction on Automatic Control* (1), *Lecture Notes in Computer Science* (6), *Acta Polytechnica Hungarica* (1) oraz czternaście rozdziałów w książkach (w tym w Springer Verlag – 5, River Publisher - 2). Oprócz tego redagował pięć monografii (Springer Verlag - 2, River Publisher - 2 i WNT - 1).

Do obrony doktoratu (1980 r.) habilitant zajmował się podstawami teoretycznymi i praktycznymi budowy modeli procesów oraz ich symulacją i optymalizacją. Konieczność poszerzenia badania tych problemów rozpoczął intensyfikować po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych, tj. od 1980 r. Dlatego rozpoczął tematykę badawczą związaną z „*Wieloaspektowym podejściem do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów*”.

Wieloaspektowe podejście przybliży i umożliwi rozwiązywanie ważnych problemów w kompleksowy i zintegrowany sposób, począwszy od technologii, modelowania i projektowania

systemu, a skończywszy na automatyzacji, sterowaniu i podejmowania decyzji. W omawianym okresie zarówno badania teoretyczne jak i aplikacyjne zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów obejmowały obszary (lecz nie były ograniczone do):

- Modelowania symulacji procesów.
- Analizy aspektów zużycia energii w procesach technologicznych.
- Struktur i algorytmów procesów sterowania.
- Struktur i algorytmów zarządzania operacyjnego.
- Estymacji zmiennych fizycznych i parametrów modelu.
- Automatyzacji procesów technologicznych.
- Systemów wspomagania podejmowania decyzji i zarządzania.
- Systemów komunikacyjnych i informatycznych.

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wniosku habilitacyjnego jest cykl publikacji powiązanych tematycznie:

**„Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”.**

Główna tematyka tych publikacji związana jest z trzema aspektami:

**iv) Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów.**

Prace w tej dziedzinie rozpoczęto we wczesnych latach osiemdziesiątych i kontynuowano do roku 2002. Były w dużej części finansowane w ramach różnych projektów ministerialnych dotyczących sieci dystrybucji wody i gazu. Oprócz charakterystyki problemów modelowania, sterowania, optymalizacji oraz symulacji w systemach dystrybucji wody zawiera również część poświęconą IT. W części tej zawarta jest propozycja hierarchicznego systemu sterowania, systemu akwizycji i transmisji danych.

Autor rozwija narzędzia, metody teoretyczne i praktyczne do analizy i rozwiązywania realnych problemów z wielu zagadnień z dziedziny modelowania, symulacji i optymalizacji procesów. Ze względu na dużą złożoność i wysoką wymiarowość badanych procesów stosowano techniki agregacji i dekompozycji. Kluczowe kwestie badane przez autora w latach 1981 – 2002 w omawianym punkcie „Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów” przedstawiono w ramach analizowania metod optymalizacji i symulacji systemów dystrybucji wody.

Czteromiesięczny pobyt habilitanta, jako Visiting Researcher, w Institute Mathematique Applique de Grenoble, Université de Grenoble w 1984 roku, przyczynił się do pogłębienia jego wiedzy i doświadczenia w rozwoju metod optymalizacji dla systemów dystrybucji wody. Jako członek Laboratorium TIM3, Equipe Algorithmique Mathematique, był zaangażowany w prace związane z tymi zagadnieniami.

W roku 2002, wspólnie z Katedrą Automatyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, współorganizował konferencję **TiASWiK’02 - Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water - 1st IFAC Conference Gdansk – Sobieszewo, Poland, June 19-21, 2002**. Konferencja ta została zorganizowana jako *IFAC I International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems*.

([http://www.ely.pg.gda.pl/ziswdis/www\\_eia\\_ziswdis\\_oferta/page\\_042.htm](http://www.ely.pg.gda.pl/ziswdis/www_eia_ziswdis_oferta/page_042.htm)). Była to doskonała okazja dla habilitanta jak i pozostałych uczestników projektów w zakresie dystrybucji w sieciach wodnych do posumowania efektów wspólnych prac.

Wkład w rozwój badań problemów symulacji, sterowania i optymalizacji systemów dystrybucji związany jest z wynikami uzyskanymi w latach (1981 - 2002) przy budowie hierarchicznych struktur sterowania systemów dystrybucji wody.

Dorobek habilitanta w zakresie tej tematyki obejmuje 35 pozycji. Są to artykuły opublikowane w czasopiśmie z LF (7), referaty krajowe (13) i zagraniczne (15).

Aktualnie, w wyniku podpisania porozumienia przez PWr z IBM Research Center, Haifa, pojawiła się możliwość realizacji wspólnych projektów w zakresie systemów dystrybucji wody:

**v) Aspekty modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych.**

Projekty te zostały rozpoczęte w ramach współpracy dwustronnej z Hiszpanią oraz były i są wspierane przez inne granty międzynarodowe (od 1999).

Zdobyte doświadczenie związane z realizacją wzmiankowanego wyżej tematu „*Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów*”, a w szczególności wyniki uzyskane w dziedzinie

modelowania, optymalizacji i symulacji procesów związane były z wykorzystaniem technik dekompozycji i agregacji. Doświadczenie to było bardzo przydatne przy realizacji projektów w rozproszonych systemach instalacji solarnych ACUREX.

Dorobek habilitanta w zakresie tej tematyki obejmuje 9 pozycji powstałych w latach 2001- 2009. Są to trzy prace z LF, jedna praca z LM, dwa rozdziały w książkach z WKiŁ oraz trzy referaty konferencyjne. Publikacje te są efektem współpracy z Universidad de Almeria i laboratorium Plataforma Solar de Almeria (<http://www.psa.es/webesp/index.php>), Hiszpania. Uzyskane wyniki są również rezultatem m udziału habilitanta w realizacji następujących grantów:

- **1998 – 2002:** Tools to model and control of a distributed solar collector field, Plataforma Solar de Almeria, Hiszpania (UE Improving Human Potential - IHP).
- **2004 – 2005:** Data Driven Analysis of Performance of Solar Plant Controllers under Disturbance Conditions (Bilateral project between University of Almeria, Spain and Wroclaw University of Technology).

vi) **Analiza metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks).**

Od roku 1999, wspólnie z uniwersytetami w USA: Northern Arizona University, Flagstaff, oraz University of Arizona, Tucson AZ, wybrano, opracowano i przetestowano oprogramowanie niezbędne do realizacji międzynarodowych projektów w ramach Global Engineering College (GEC). Korzystając z doświadczenia uzyskanego przy realizacji projektu „24/7 Software development...” rozpoczęto również prace związane z analizą, modelowaniem i symulacją Bezprzewodowych Sieci Czujników (WSN).

Habilitant uczestniczy w realizacji projektów związanych z tą tematyką od roku 2001 w ramach współpracy z University of Arizona, Department of Electrical and Computer Engineering, Tucson oraz z University of Technology Sydney.

Od 2008 uczestniczył w realizacji projektu:

„Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku – modelowanie i monitoring zagrożeń”.

Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, 2007-2013, Numer projektu POIG.01.03.01-02-002/08.

**Przedstawiony cykl publikacji powiązanych tematycznie stanowi osiągnięcie polegające na dogłębnej charakterystyce problemów modelowania, sterowania, optymalizacji oraz symulacji procesów w ramach tematyki badawczej „Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”.**

Wkładem w rozwój nauki, a w szczególności automatyki i robotyki, są wyniki uzyskane w dziedzinie modelowania, optymalizacji i lokalizacji procesów; w szczególności oryginalne i efektywne połączenie prac podstawowych z zastosowaniami.

W cyklu przeszło 60 publikacji powiązanych tematycznie główną uwagę zwrócono na praktyczne wykorzystanie wieloaspektowego podejścia do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów przy zastosowaniu technik agregacji i dekompozycji.

Wyróżniono trzy grupy publikacji połączone tematyką: optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów; modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych oraz analizy metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN).

Prace z dziedziny IT są umieszczone w stosownych załącznikach, jednak nie były omawiane. Stanowią one potwierdzenie faktu, że prezentowane problemy były rozpatrywane również w aspekcie praktycznym.

Prace trzech wyżej wymienionych grup tematycznych:

- Aspekty optymalizacji i symulacji w systemach dystrybucji mediów.
- Aspekty modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych.
- Analiza metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN – Wireless Sensors Networks).

stanowią **cykl publikacji powiązanych tematycznie** w ramach tematu:

„Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów”

Z ponad 60 publikacji powiązanych tematycznie habilitant wyselekcjonował **czternaście prac zawierających najcenniejsze osiągnięcia omawianej tematyki.**

### Są to prace z LF:

- Cirre Cristina, Berenguel Manuel, Valenzuela Loreto, **Klempous Ryszard**: Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717, 12 rys., 1 tab., bibliogr. [14] poz. Lokalizacja elektroniczna(EJOR): <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056> ;
- Berenguel Manuel, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Valenzuela Loreto: Explanatory analysis of data from a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 621-626, bibliogr. 13 poz. [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_83);
- Berenguel Manuel, Cirre Cristina M, **Klempous Ryszard**, Maciejewski Henryk, Nikodem Maciej, Nikodem Jan, Rudas Imre, Valenzuela Loreto: Hierarchical control of a distributed solar collector field. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005, vol. 3643, s. 614-620, 3 rys., bibliogr. 9 poz. [http://dx.doi.org/10.1007/11556985\\_82](http://dx.doi.org/10.1007/11556985_82).
- **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Olesiak Marek, Ulasiewicz Jędrzej: Some models for water distribution systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1988 vol. 21, nr 3, s. 257-269. LF,
- **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Ulasiewicz Jędrzej: Optimization algorithms of operative control in water distribution systems, *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1997 vol. 84, s.81-99, LF,

Na konferencji EURO XXI 2006, Reykjavik, spośród 1800 wygłoszonych referatów, na organizowanej przez autora Invited Session: Hierarchical models applications (<http://www.euro2006.org/EuroFinalProgramme.pdf>), został wyselekcjonowany referat: "Reference Governor Optimization and Control of a Distributed Solar Collector Field" autorów :Cristina Rogelia Martinez Cirre, Loreto Valenzuela, **Ryszard Klempous**, Manuel Berenguel. Autorów zaproszono do przygotowania artykułu, jako jednego z dwunastu wybranych, do *European Journal of Operational Research*. 2009, vol. 193, nr 3, s. 709-717. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>?. Jest to też efekt wieloletniej współpracyhabilitanta z Universidad de Almeria i Plataforma Soalr de Almeria.

### Prace z LM są następujące:

- Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Maciej, Woda Marek, Chaczko Zenon: Directed cooperation in multihop wireless sensors network. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2010, vol. 56, nr 1, s. 7-11.
- **Klempous Ryszard**: Determination of feasible set of solutions for mixed integer nonlinear optimization problem. *CASYS: International Journal of Computing Anticipatory Systems*. 2006, vol. 19, s. 123-134.
- Nikodem Jan, **Klempous Ryszard**, Nikodem Michał Berenguel Manuel: Diagnostyka procesu sterowania instalacją pozyskiwania energii słonecznej. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*. 2005, wyd. spec. 9, bis, s. 213-216).

### Referaty konferencyjne:

- **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Nikodem Jan, Szlachcic Ewa, Ulasiewicz Jędrzej: Simulation, control and optimization problem in distribution networks-survey our results / I IFAC International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems, TiASWiK '02, Gdańsk 2002 : Gdańsk-Sobieszewo, June 19-21, 2002 / [Ed. by Kamil Konarczak, Dariusz Trawicki], Gdańsk: Wydaw. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PGdań., 2002]. s. 1-12,
- Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał P, Rozenblit Jerzy: An improvement of energy aware routing in wireless sensors network. W: *International Mediterranean Modelling Multiconference 2006*. [2nd European Modeling and Simulation Symposium. EMSS 2006], Barcelona, Spain, October 4-6, 2006 / Ed. by A. G. Bruzzone [i in.]. Piersa : LogiSim, cop. 2006. s. 599-604.
- Chaczko Zenon, **Klempous Ryszard**, Nikodem Jan, Nikodem Michał: Methods of sensors localization in wireless sensor networks. W: *Raising expectations of computer-based systems. 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems. ECBS 2007. Proceedings, Tucson, Arizona, March 26-29, 2007 / Ed. by John Leaney, Jerzy W. Rozenblit, Jianfeng Peng. Los Alamitos [i in.] : IEEE Computer Society [Press], cop. 2007. s. 145-152.*

### Raporty Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble:

- **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: Quelques proprietes asymptotiques de la solution d'un probleme de minimisation de gaspillages d'energie dans un reseau de distribution d'eau, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères). IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, R.R. 489, 1984 - 14 pages,
- **Klempous Ryszard**, Kotowski Jerzy, Olesiak Marek: An Algorithm for solving a Problem of Energy Wastes In Water Distribution System, Rapport de recherche/IMAG Université Grenoble IMAG (Saint Martin d'Hères). IMAG, Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, , R.R. 486, 1984 - 16 pages,



### **Rozdział w monografii:**

*Nikodem Jan, Nikodem Maciej, Woda Marek, Klempous Ryszard, Chaczko Zenon: Relation-based message routing in wireless sensor networks: Smart wireless sensor networks / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka : InTech, 2010. s. 127-145.*

Rozdział „**Relation-based message routing in wireless sensor networks**” w monografii: *Smart wireless sensor networks* / ed. by Hoang Duc Chinh, Yen Kheng Tan. Rijeka: InTech, był pobierany z sieci przeszło 3 tys. razy.

Jako osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego z zakresu tej tematyki badawczej wskazuje wyniki badań uzyskane w systemach dystrybucji mediów, w rozproszonych systemach solarnych i w bezprzewodowych sieciach sensorowych. Modelowanie dotyczy zarówno statycznych i dynamicznych modeli procesów. Ilustrowane to zostało na przykładzie systemów dystrybucji mediów, systemów pozyskiwania energii słonecznej oraz bezprzewodowych sieci sensorowych (WSN).

Technologia IT musi być równocześnie projektowana i uruchamiana. Służy do weryfikacji opracowanych modeli procesów. Zaawansowana baza danych umożliwia analizę gromadzonych w długim okresie czasu w trybie on-line w oparciu o nowoczesne narzędzia informatyczne (np. OLAP – Online Analytical Processing czy DM – Data Mining).

W analizowanej tematyce wspólną cechą były zagadnienia budowy modeli procesów, symulacja procesów związanych z tymi modelami oraz budowa algorytmów optymalizacji.

Ze względu na występującą w omawianych procesach dużą złożoność i duży wymiar stosowano techniki agregacji oraz dekompozycji. Podstawowe problemy optymalizacyjne były związane z minimalizacją zużycia energii elektrycznej lub też z optymalizacją jej wytwarzania.

Uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład do dyscypliny naukowej Automatyka i Robotyka. Treść cyklu publikacji powiązanych tematycznie pt. „Wieloaspektowe podejście do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” wskazanego jako osiągnięcie, została szczegółowo omówiona w autoreferacie.

**Wkład w realizację „Aspektów modelowania, optymalizacji, sterowania i symulacji w rozproszonych systemach solarnych”** na przykładzie instalacji ACUREX polegał głównie na:

- Określeniu hierarchicznej, czterowarstwowej struktury sterowania.
- Analizie fizycznego modelu optymalizacji wykorzystującego strukturę hierarchiczną.
- Opracowaniu fizycznego modelu instalacji PSA oraz modelu optymalizacji o hierarchicznej strukturze, zapewniającej optymalizację zadanej temperatury w dolnej warstwie systemu sterowania.
- Określeniu hierarchicznej struktury sterowania, obejmujące dolną warstwę sterowania, problem optymalizacji wartości zadanej; dobowych problemów sterowania operacyjnego i problemu planowania produkcji.
- Opracowaniu metod i narzędzi eksploracji danych z systemów monitorowania instalacji słonecznych w celu wspomagania budowy i weryfikacji modeli instalacji w zmiennych warunkach środowiskowych.

**Ważniejsze osiągnięcia w zakresie Analizy metod lokalizacji i symulacji w bezprzewodowych sieciach sensorowych (WSN).**

Inny obszar cyklu publikacji powiązanych tematycznie w „Wieloaspektowym podejściu do zagadnień modelowania, symulacji i optymalizacji procesów” został omówiony na przykładzie *Analizy metod lokalizacji i symulacji w WSN*.

Wykorzystując współczesne technologie internetowe realizowano współpracę międzynarodowych grup projektowych: „Realizacja oprogramowania 24/7 z wykorzystaniem technik IT: Określenie zadań i narzędzi” (24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week). Korzystając z doświadczenia uzyskanego przy realizacji projektu „24/7 Software development...” przy udziale University of Arizona, Tucson oraz University of Technology, Sydney rozpoczęto również prace związane z analizą, modelowaniem i symulacją Bezprzewodowych Sieci Czujników (WSN) – „An improvement of energy aware routing wireless sensors network”. Badania te rozpoczęto i kontynuowano w ramach współpracy z University of Arizona, Tucson oraz University of Technology, Sydney oraz Johannes Kepler University, Linz w latach 2001- 2009. Prace te związane były z analizą, modelowaniem i symulacją WSN.

Celem badań było opracowanie metodologii, formalizacji opisu i modelowania działań w Bezprzewodowych Sieciach Czujników (WSN). Dokonano oceny badanych algorytmów komunikacji w sieciach WSN. W ramach prowadzonych prac, dokonano modyfikacji algorytmów klasteryzacji (clustering) i routingu oraz śledzenia (tracking) i lokalizacji (localization). Zaproponowano relacyjne, zamiast funkcyjnego, podejście do zagadnienia routingu. W oparciu o uzyskane wyniki teoretyczne zaprojektowano i wykonano symulator sieci. Zaproponowano również algorytmy i procedury działania czujników w WSN pozwalających zapewnić wysoki poziom bezpieczeństwa, przy zachowaniu małej złożoności pamięciowej i małych poborach mocy. Efektem końcowym badań są propozycje algorytmów i protokołów dla sieci czujników bezprzewodowych oraz badania ich praktycznych możliwości zastosowania w rzeczywistych sieciach.

Przeprowadzone badania związane były z zagadnieniami:

- modelowania współpracy elementów sieci w aspekcie działań rozproszonych oraz określania poziomów autonomii i zasięgów lokalności zdarzeń,
- ustanawiania bezpiecznego kanału komunikacyjnego oraz niezawodnego przesyłania informacji pomiędzy węzłami sieci,
- przetestowania podejścia relacyjnego, zamiast funkcyjnego, w celu poprawy efektywności (wydatku energetycznego i niezawodności) WSN.

Z ponad 60 opublikowanych prac w latach 1981 -2013 dotyczących wymienionych wyżej zagadnień w ramach autoreferatu omówiono 14 pozycji, w tym 5 prac z LF, 3 prace z LM, 3 referaty konferencyjne, 3 raporty *Rapport de Recherche/IMAG Université Grenoble* oraz 1 rozdział w książce.

### **Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

Habilitant zajmował się również komputerowo wspomaganymi procesami wspomagania decyzji i przetwarzania danych:

- zagadnieniami wykorzystania metod przetwarzania obrazów do modelowania wirtualnej rzeczywistości,
- algorytmami kierowania rozproszonymi zespołami projektowymi,
- metodologią projektowania budynków inteligentnych,
- analizą procesów edukacyjnych,
- metodami optymalizacji procesów przemysłowych.

Osiągnięcia badawcze habilitanta są silnie powiązane z aktywną współpracą z ośrodkami naukowymi na świecie. Habilitant spędził przeszło trzy lata prowadząc badania w renomowanych ośrodkach naukowych m.in. takich jak np. Université de Grenoble; Johannes Kepler University, Linz; University of Arizona, Department of Electrical and Computer Engineering, Tucson (AZ); Rutgers University (NJ), Bell Labs Murray Hill (NJ); Northern Arizona University, Flagstaff, AZ; Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Universidad de Almeria; University of Technology Sydney.

Wykorzystując współczesne technologie internetowe, realizował współpracę międzynarodowych grup projektowych: „Realizacja oprogramowania 24/7 z wykorzystaniem technik IT: określenie zadań i narzędzi” (24/7 Software development in Virtual Student Exchange groups: redefining the work and study week). Efektem tych prac, oprócz licznych publikacji, było współdyktorstwo książki z tej tematyki w wydawnictwie River Publishers: „Stealing Time: Exploration in 24/7 Software Engineering Development”.

Habilitant współorganizował liczne, wysoko notowane konferencje oraz recenzuje artykuły naukowe (w tym i dla czasopism z LF).


Jest:

**Editorial Advisory** w International Journal of Electronics and Telecommunications, Polish Academy of Sciences, Committee of Electronics and Telecommunications;

**Associate Editor** w Acta Polytechnica Hungarica Journal of Applied Sciences;

**Technical Committee Member** on Computational Cybernetics within System, Man and Cybernetics Society, IEEE, <http://www.ieeesmc.org/technical-activities/cybernetics/computational-cybernetics>

**Coauthor Index według The DBLP Computer Science Bibliography** obejmuje listę 36 nazwisk.

 **Universität Trier:**

<http://www.informatik.uni-trier.de/~lev/pers/hd/k/Klempous:Ryszard>

Na szczególne podkreślenie zasługuje udział habilitanta (od trzech ch lat), jako eksperta, w światowym systemie ewaluacji szkół wyższych **QS World University Rankings®** (<http://www.iu.qs.com/university-rankings/>). QS Intelligence Unit is at the forefront of developing and successfully implementing comparative data to highlight the relative strength of institutions.

