

## Komputerowy system zarządzania mocą i energią w mikrosieci ośrodka badawczo-szkoleniowego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono symulowany komputerowy system zarządzania mocą i energią elektryczną w mikrosieci budowanego ośrodka badawczo-szkoleniowego. Na początku krótko scharakteryzowano rozważaną mikrosieć niskiego napięcia prądu przemiennego, a następnie opisano elementy składowe opracowanego systemu informatycznego dla tej mikrosieci. Ponadto zaprezentowano wyniki przykładowych symulacji komputerowych uzyskanych w oparciu o wspomniany system oraz omówiono zagadnienie wyznaczania wskaźników niezawodnościowych. Całość zakończono podsumowaniem i przedstawieniem kierunków dalszych badań.

**Abstract.** The paper presents a simulated power and energy management computer system for a microgrid of the research and educational center under construction. First, the low voltage AC microgrid considered is shortly characterized. Then, the components of the computer system designed for the microgrid are described. Moreover, the results of computer simulations obtained with the use of the system mentioned are included, along with discussion of the problem of calculation the reliability indexes. The paper is completed with the summary and the presentation of further possible research directions. (The computer system for the power and energy management in a microgrid of the research and educational center).

**Słowa kluczowe:** ośrodek badawczo-szkoleniowy, mikrosieć, zarządzanie mocą i energią, system komputerowy.

**Keywords:** research and educational center, microgrid, power and energy management, computer system.

### Wstęp

Rozproszona generacja energii elektrycznej i wykorzystanie do tego celu źródeł energii odnawialnej są obecnie bardzo dynamicznie rozwijającymi się technologiami. Ograniczają one emisję gazów cieplarnianych do atmosfery, a koszty przesyłu energii z reguły maleją, ze względu na zazwyczaj lokalne wykorzystanie generowanej energii. Problemem użycia źródeł odnawialnych jest na ogół ich silna zależność od warunków atmosferycznych (np. siły wiatru lub nasłonecznienia), a tym samym duża zmienność produkcji energii w czasie. Możliwość magazynowania energii elektrycznej jest bardzo ograniczona, a samo magazynowanie jest obciążone stratami. Lokalne zagospodarowanie produkcji energii ze źródeł odnawialnych ogranicza jej zmienność w systemie elektroenergetycznym i nie powoduje niepożądanych odchyłań w stosunku do zakontraktowanego poboru mocy.

Mikrosieć jest mikrosystemem energetycznym [1], w którym mogą występować mikroźródła, odbiory oraz zasobniki energii. Szczególnym typem użytkowników sieci są prosumenci, którzy mogą być dostawcami lub odbiorcami energii. Mikrosieć posiada zdolność przyłączania się do oraz odłączania się od sieci operatora systemu dystrybucyjnego (OSD), tj. może pracować w trybie równoległym z siecią OSD, jak i w trybie wyspowym. W tym ostatnim trybie musi potrafić samodzielnie bilansować moc i energię wewnątrz obszaru swojego działania.

Mikrosieci zapewniają różne korzyści, takie jak:

- możliwość wewnętrznego bilansowania mocy,
- większą niezawodność zasilania odbiorców,
- łatwiejsze i tańsze wprowadzenie nowych technologii wytwarzania energii i eksploatacji sieci,
- łatwiejsze i tańsze utrzymanie sieci.

System informatyczny może wspomagać zarządzanie mocą i energią w mikrosieciach energetycznych dzięki podłączeniu do niego urządzeń pomiarowych i czujników oraz elementów wykonawczych. Pozwala to:

- zmniejszyć całkowite zapotrzebowanie na moc przez ograniczenie jej strat w elementach sieci,
- zmniejszyć poziom dobowych szczytów poboru mocy,
- dostosować pobór mocy do możliwości jej dostawy ze źródeł znajdujących się w mikrosieci oraz do opłat za

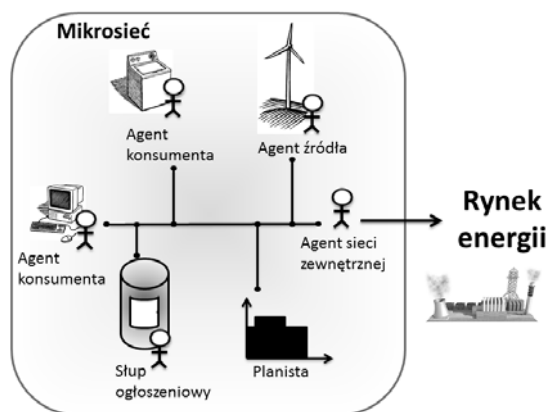
pobieraną moc i energią elektryczną ustalanych przez OSD,

- zapewnić odpowiedni stopień opomiarowania sieci oraz zarządzania mocą i energią.

Zagadnienia dotyczące zarządzania mocą i energią w mikrosieciach były ogólnie opisane w publikacji [2].

Dzięki odpowiedniemu sterowaniu, system zarządzania mocą i energią (ang. Energy Management System – EMS) umożliwia [2]:

- bardziej efektywne wykorzystanie odnawialnych źródeł oraz zasobników energii,
- dokładniejsze bilansowanie mocy,
- ciągle monitorowanie generowanej i pobieranej mocy,
- handel energią w czasie rzeczywistym,
- prognozowanie i planowanie produkcji i zużycia energii elektrycznej w różnych horyzontach czasowych.



Rys. 1. Ogólna koncepcja działania mikrosieci z wykorzystaniem systemów wieloagentowych

Do zarządzania pracą mikrosieci można użyć systemów rozproszonych, a w szczególności systemów wieloagentowych (ang. multi-agents systems), które dzięki swojej architekturze zapewniają elastyczność i skalowalność systemu. Ogólna koncepcja działania takiego systemu została przedstawiona na rysunku 1. Szerszy przegląd prac z tego tematu można znaleźć w artykułach podanych w wykazie literatury na końcu tego opracowania.

## Mikrosieć w ośrodku badawczo-szkoleniowym

W artykule rozważa się mikrosieć w ośrodku badawczo-szkoleniowym [2, 3, 4]. Analizowaną mikrosieć tworzą: stacja elektroenergetyczna SN/nn, elektroenergetyczna sieć kablowa nn i instalacje elektryczne łącznie z odbiorami energii, zlokalizowane w 5 budynkach centrum badawczo-szkoleniowego w zakresie energetyki odnawialnej. Zakłada się, że urządzenia pomiarowe będą zainstalowane w punktach dostawy i poboru mocy i energii.

W ośrodku badawczo-szkoleniowym planuje się zainstalowanie następujących mikroźródeł [2, 3, 4]:

- mikroturbiny gazowej o mocy 65 kW,
- spalinowego agregatu prądotwórczego o mocy 50 kW,
- 3 małych hydrozespołów (turbiny) wodnych o mocy 30 kW każda,
- 3 mikroturbin wiatrowych o mocy 10 kW każda,
- 2 systemów paneli fotowoltaicznych o mocy odpowiednio 12,6 kW i 10,5 kW.

Ponadto, przewiduje się zainstalowanie dwóch zasobników energii: zestawu baterii akumulatorów oraz zestawu kół zamachowych.

W budynkach ośrodka będą znajdowały się m.in.:

- sale konferencyjne,
- 6 sal seminaryjnych,
- 34 pomieszczenia badawcze i biurowe,
- część hotelowa z 32 pokojami,
- restauracja z zapleczem kuchennym,
- pomieszczenia socjalne i użytkowe.

W pomieszczeniach tych będą zlokalizowane odbiorniki energii elektrycznej i ciepła.

## System zarządzania mocą i energią

W systemie można wyróżnić następujące poziomy zarządzania [2, 5]:

- wyprzedzającego planowania i harmonogramowania poboru mocy i energii,
- prognozowania wytwarzanej mocy i energii,
- zarządzania niezbilansowaniem mocy,
- monitorowania stanu pracy sieci,
- wyznaczania wskaźników niezawodnościowych.

Do planowania i harmonogramowania potrzebne są m.in. takie dane jak [2]:

- ogólne, typowe profile obciążeń odbiorów energii,
- dane pogodowe (meteorologiczne) do prognoz mocy generowanej przez odnawialne źródła energii,
- plany wykorzystania pomieszczeń i urządzeń w nich występujących (np. rezerwacja sal i sprzętu),
- planowane wydarzenia, takie jak: konferencje, spotkania, wykłady i seminaria, a także eksperymenty badawcze.

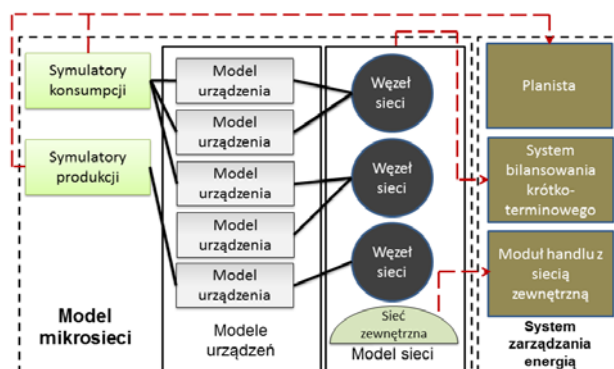
Prognozowanie nie jest dotychczas zaimplementowane w systemie. Badane metody prognostyczne przedstawiono w monografii [6].

Zaprojektowany schemat EMS został przedstawiony na rysunku 2. W skład tego systemu wchodzi [2]:

- modele sieci elektroenergetycznej oraz urządzeń elektrycznych,
- symulatory wytwarzania (jednostek wytwórczych) i poboru mocy i energii,
- Planista,
- system bilansowania krótkoterminowego,
- moduł prowadzenia handlu,
- moduł modelowania i wyznaczania wskaźników niezawodnościowych.

Do przeprowadzania symulacji komputerowych został opracowany model sieci i instalacji elektrycznych, a następnie program wyznaczający rozpiętkę mocy w rozważanej mikrosieci [3]. Program ten pozwala na

identyfikowanie przeciążonych gałęzi (transformatora SN/nn, linii kablowych nn, instalacji elektrycznych nn), jak również węzłów sieci, w których są przekroczone dopuszczalne odchylenia napięcia. Węzły sieci mogą reprezentować grupy urządzeń elektrycznych lub obwody gniazd wtyczkowych.



Rys. 2. Schemat systemu zarządzania mocą i energią elektryczną

Symulatory jednostek wytwórczych charakteryzują się następującymi cechami [7]:

- w modelach jednostek wytwórczych uwzględniono czynniki meteorologiczne: natężenie promieniowania słonecznego, prędkość wiatru, przepływ wody, temperaturę powietrza;
- symulatory odwziewierają zmienność dobową, tygodniową i sezonową wspomnianych czynników, a także dostarczają danych z dużą częstotliwością;
- do zasymulowania czynników meteorologicznych użyto zestawu rzeczywistych pomiarów, a w celu utworzenia scenariuszy testowych została zastosowana metoda „matched-block bootstrap”;
- symulacje mogą być przeprowadzane wiele razy z uwzględnieniem czynnika losowego, aby umożliwić określenie właściwości statystycznych (rozkładu prawdopodobieństwa, wartości średniej, odchylenia standardowego, itd.) np. czasu bilansowania lub reakcji na zmiany poziomów mocy.

Z kolei, w przypadku symulatorów odbiorów mocy założono, że [8]:

- im większy system, tym bardziej zagregowane są zachowania użytkowników;
- zachowanie użytkownika może być nieskoordynowane, nieprzewidywalne i zmienne;
- źródła światła, urządzenia klimatyzacyjne, systemy wentylacyjne są opisywane przez odpowiednie profile, ponieważ ich działanie jest przewidywalne;
- zachowanie innych urządzeń można opisać przez:
  - profile,
  - profile losowe (prawdopodobieństwa),
  - reguły,
  - reguły z krótkoterminowymi profilami.

Zadaniem modułu planisty jest harmonogramowanie pracy odbiorów i źródeł w dostępnym zakresie [2]. Planista przechowuje zapisy zdarzeń i zadań zdefiniowane przez użytkowników (np. szkolenie, spotkanie, konferencja) i po optymalizacji proponuje najlepsze terminy wykonania tych zadań/zdarzeń w ramach określonych ograniczeń. Ponadto, znając średnie zużycie energii i harmonogram zadań, Planista ustala plan pracy źródeł energii elektrycznej w ośrodku, tak aby zminimalizować koszty działania ośrodka. Dzięki temu system przyczynia się do zmniejszenia nagłych skoków zużycia energii i umożliwia negocjowanie bardziej korzystnych kontraktów z OSD.

Przykład interfejsu użytkownika modułu planisty został zaprezentowany na rysunku 3.

Bilansowanie krótkoterminowe jest oparte na rozproszonym systemie agentowym [2, 5, 9, 10], w którym agent reprezentuje i steruje węzłem w systemie. Agent urządzenia sterowalnego może ustawić punkt pracy urządzenia; na przykład mikroturbiny gazowej czy zestawu baterii akumulatorów. Z kolei agent urządzenia niesterowalnego jedynie zna stan tego urządzenia; takimi urządzeniami są na przykład odnawialne źródła energii, odbiory mocy (np. komputery).



Rys. 3. Przykład interfejsu użytkownika modułu Planisty - zrzut ekranu działającej aplikacji komputerowej

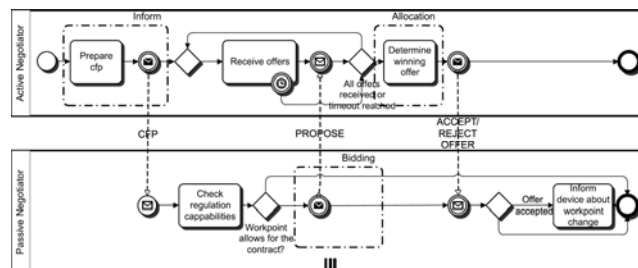
Agent urządzenia jest implementowany w postaci grupy subagentów, która zawiera subagenta o nazwie Modeler oraz subagenta o nazwie Negocjator. Agent taki może być aktywny (typowo jest to agent urządzenia niesterowalnego) lub pasywny (agent urządzenia sterowalnego). Komunikacja zachodzi jedynie między agentami: pasywnym i aktywnym. Bateria akumulatorów ma zarówno agenta pasywnego jak i aktywnego. System wieloagentowy zawiera również dwa agenty administracyjne o nazwie Morris Column (Słup ogłoszeniowy) oraz Monitor.

W celu bilansowania mocy stosowane jest podejście podobne do podejścia występującego na rynku energii. Negocjator urządzenia aktywnego wykrywa zmianę poziomu produkcji swojego urządzenia i wysyła oferty do Negocjatorów urządzeń pasywnych, określając wielkość mocy potrzebnej do zbilansowania sieci. Po otrzymaniu odpowiedzi od urządzeń gotowych do wyrównania niezbilansowania wybiera tę z najmniejszym „kosztem” podczas bilansowania deficytu mocy lub tę z największym „kosztem” podczas bilansowania nadwyżki mocy. Ze względu na to, że analizowane centrum badawcze ma jednego właściciela, „koszt” jedynie szereguje urządzenia i nie musi odpowiadać rzeczywistym kosztom ich pracy. W ten sposób można też uwzględnić pozakosztowe preferencje właściciela.

Schemat komunikacji między agentami podczas negocjacji pokazano na rysunku 4.

Do symulacji handlu energią między centrum badawczym i OSD został opracowany specjalny moduł symulatora rynku energią w sieci dystrybucyjnej [2]. Symulator ten został zaimplementowany przy użyciu sztucznej sieci neuronowej, którą wyuczono za pomocą danych z towarowej giełdy energii. Jako rynkowy mechanizm negocjacyjny na rynku sieci dystrybucyjnej została wybrana aukcja ciągła dwustronna. W celu ustalenia ceny zakupu lub sprzedaży były rozważane

strategie negocjacyjne na tego typu rynku, takie jak ZIP i AA [11].



Rys. 4. Schemat komunikacji między agentami podczas negocjacji dotyczących zmiany punktu pracy [9]

### Przykładowe symulacje komputerowe

W celu sprawdzenia poprawności działania opracowanego systemu zarządzania mocą i energią w ośrodku badawczo-szkoleniowym przeprowadzono przykładowe symulacje komputerowe [2, 9]. Początkowo badania zostały przeprowadzone na 20 komputerach; tak że jedno urządzenie elektryczne przypadało na jeden komputer. Średni czas bilansowania mocy wyniósł wówczas około 14 ms. Po wzroście ogólnej liczby urządzeń do 150 (na tych samych 20 komputerach) czas bilansowania wydłużył się dochodząc do 150ms, przy średniej rzędu 40 ms. Jest to naturalny efekt obciążenia procesorów i bazy danych wielowątkową aplikacją, gdzie występował problem opóźnień przełączania wątków poszczególnych agentów. Wyniki pokazują, że system informatyczny, nawet pod pewnym obciążeniem, jest w stanie nadążyć za zmieniającymi się warunkami w sieci elektroenergetycznej i wspomóc jej bilansowanie.

Wyniki przykładowej symulacji komputerowej dotyczącej zarządzania mocą zostały przedstawione na rysunku 5. Uwzględniono w niej jedynie mikroturbinę gazową, mikroturbinę wiatrowe, odbiorców oraz sieć OSD.



Rys. 5. Wynik przykładowej symulacji komputerowej

### Wyznaczanie wskaźników niezawodnościowych

Niezawodność pracy jest istotną właściwością inteligentnych sieci elektroenergetycznych, gdyż jest to jeden z najważniejszych czynników wpływających na ciągłość dostaw energii elektrycznej do urządzeń odbiorczych. Złożoność sieci i duża liczność różnorodnych jej elementów, które mogą ulegać uszkodzeniom, powoduje, że analiza niezawodnościowa sieci elektroenergetycznych jest zagadnieniem trudnym. Ponieważ sieć elektroenergetyczna jest zbudowana z elementów w zasadzie niezależnych oraz ma strukturę typu zespołu modułów szeregowo-równoległych, należało opracować odpowiednią metodykę wyznaczania wskaźników charakteryzujących proces uszkodzeń i napraw tej sieci o powyższych właściwościach.

Wskaźniki niezawodnościowe sieci elektroenergetycznych można podzielić na dwie podstawowe grupy. W pierwszej znajdują się binarne wskaźniki charakteryzujące ciągłość zasilania poszczególnych punktów poboru mocy, a w drugiej – wskaźniki charakteryzujące tak zwaną wystarczalność, czyli stopień zaspokojenia popytu odbiorców energii. Opracowano algorytm wyznaczania wskaźników ciągłości zasilania dla poszczególnych punktów poboru mocy w mikrosieci ośrodka badawczo-szkoleniowego oraz uruchomiono program komputerowy służący do wyznaczania tych wskaźników w stanie pracy synchronicznej z siecią OSD. Program ten pozwolił na wyznaczenie dla każdego węzła takich wskaźników jak: gotowości pobytu w określonym stanie, intensywności przejść z jednego stanu do drugiego, średnie czasy pobytu w określonym stanie, średnie liczby przejść z jednego stanu do drugiego. Ponadto, program umożliwił wyznaczenie wskaźników niezawodnościowych charakteryzujących analizowaną mikrosieć, takich jak: SAIFI, MAIFI, ASAI, SAIDI.

### Podsumowanie i kierunki dalszych badań

W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat systemu zarządzania mocą i energią w mikrosieci obejmującej swym zasięgiem ośrodki badawczo-szkoleniowy. Występują w niej odnawialne źródła energii oraz zasobniki energii. Przedstawione podejście jest złożone (opiera się między innymi na systemie wieloagentowym) i wykorzystuje wiele dostępnych danych, w szczególności meteorologicznych. Krótko omówiono poszczególne elementy składowe systemu zarządzania, jak również przedstawiono wyniki przykładowej symulacji komputerowej. Otrzymane dotychczas wyniki działania systemu bilansowania mocy w analizowanej mikrosieci są zachęcające i skłaniają do prowadzenia dalszych badań.

W dalszych badaniach należałoby w szczególności [2]:

- zwrócić baczność uwagę na pracę mikrosieci w trybie wyspowym,
- poddać analizie handel energią z lokalnym rynkiem energii,
- sprawdzić różne algorytmy krótkoterminowego bilansowania mocy,
- wprowadzić prognozy ultra- i krótkoterminowe w celu poprawy procedury bilansowania mocy.

*Praca była częściowo finansowana przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego jako projekt badawczy własny nr N N519 580238. Mgr inż. Weronika Radziszewska była także częściowo finansowana przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej przez projekt Międzynarodowych Projektów Doktoranckich w IBS PAN, projekt ten był finansowany ze środków z funduszy europejskich w ramach Działania 1.2 „Wzmocnienie potencjału kadrowego nauki” Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013.*

### LITERATURA

- [1] *Mikrosieci niskiego napięcia. Praca zbiorowa pod redakcją Mirosława Parola.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (2013).
- [2] Radziszewska W., Parol M., Nahorski Z., Symulacje komputerowe systemu zarządzania mocą i energią w mikrosieci ośrodka badawczo-szkoleniowego. Redakcja naukowa J. Popczyk, R. Kucęba, K. Dębowski, W. Jędrzejczyk, *Energetyka Prosumencka. Pierwsza próba konsolidacji.* Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, (2014), Częstochowa, 225-229.
- [3] Parol M., Wasilewski J., Wójtowicz T., Nahorski Z., Low voltage microgrid in a research and educational center. *Proc. of the Conference ELEN 2012*, CTU in Prague, Faculty of Electrical Engineering, 11-12 September 2012, page(s): 15 pp. (pendrive).
- [4] Wasilewski J., Parol M., Wójtowicz T., Nahorski Z., A microgrid structure supplying a research and education centre – Polish case. *Proc. of the 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe Conference*, Berlin, October 14-17, 2012, page(s): 8 pp. (pendrive).
- [5] Radziszewska W., Nahorski Z., Parol M., Pałka P., Intelligent computations in an agent-based prosumer-type electric microgrid control system, L.T. Kóczy, C.R. Pozna, J. Kacprzyk (Eds.) *Issues and Challenges of Intelligent Systems and Computational Intelligence*, Studies in Computational Intelligence, Vol. 530, Springer, (2014), 293-312.
- [6] Piotrowski P.: *Prognozowanie w elektroenergetyce w różnych horyzontach czasowych*, Prace Naukowe „Elektryka”, z. 144, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (2013).
- [7] Radziszewska W., Nahorski Z., Generation of inputs to renewable energy sources using matched-block bootstrap approach with fitness proportional selection. Page B., A.G. Fleisher, J. Göbel, V. Wohlgemuth (Eds.) *Proc. of the 27th Conf. on Environmental Informatics*, Hamburg, September 2-4, 2013, Shaker Verlag, Aachen, 727-735.
- [8] Radziszewska W., Nahorski Z., Modeling of power consumption in a small microgrid. In: J. M. Gómez, M. Sonnenschien, U. Vogel, A. Winter, B. Rapp, N. Giesel: *Information and Communication Technology for Energy Efficiency EnviroInfo 2014 – 28<sup>th</sup> International Conference on Informatics for Environmental Protection*. Oldeburg, Germany, September 10-12, 2014, 381-388.
- [9] Pałka P., Radziszewska W., Nahorski Z., Balancing electric power in a microgrid via programmable agents auctions. *Control and Cybernetics*, 41(4), (2012).
- [10] Pałka P., Radziszewska W., Nahorski Z., Application of an auction algorithm in an agent-based power balancing system. M. Pechenizkiy, M. Wojciechowski (Eds.) *New trends in Databases and Information Systems*. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 185, Springer, (2013), 231-240.
- [11] Nahorski Z., Radziszewska W., Price formation strategies of programmable agents in continuous double auctions, M. Bustowicz, K. Malinowski (Eds.) *Advances in Control Theory and Automation*. Komitet Automatyki PAN, Oficyna Wyd. Politechniki Białostockiej, (2012), 181-194.

**Autorzy:** mgr inż. Weronika Radziszewska, Instytut Badań Systemowych PAN, ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa, e-mail: Weronika.Radziszewska@ibspan.waw.pl; dr hab. inż. Mirosław Parol, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: miroslaw.parol@ien.pw.edu.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski, Instytut Badań Systemowych PAN, ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa, e-mail: Zbigniew.Nahorski@ibspan.waw.pl.