

**Paweł SŁOMIŃSKI, Antoni NOWAKOWSKI**

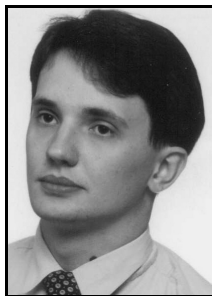
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

## Wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych do wyznaczania dostaw gazu ziemnego z sieci niskiego ciśnienia

Mgr inż. Paweł SŁOMIŃSKI

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Pracę magisterską obronił w 1997 r. Obecnie uczestnik zaocznego studium doktoranckiego na Wydziale Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Przygotowuje pracę doktorską z zakresu monitoringu strat w systemach dystrybucji gazu. Jednocześnie kierownik Działu Zakupu i Bilansowania Gazu w Pomorskiej Spółce Gazownictwa Sp. z o.o.

e-mail: [pawel.slominski@psgaz.pl](mailto:pawel.slominski@psgaz.pl)



Prof. dr hab. inż. Antoni NOWAKOWSKI

Kierownik Katedry Inżynierii Biomedycznej na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji, Informatyki Politechniki Gdańskiej jest opiekunem naukowym Pawła Słomińskiego. Katedra zajmuje się nie tylko zagadnieniami inżynierii biomedycznej, ale także problemami monitoringu środowiska, gdzie zagadnienie kontroli zanieczyszczeń powietrza jest jednym z istotniejszych problemów badawczych i praktycznych.

e-mail: [antowak@biomed.eti.pg.gda.pl](mailto:antowak@biomed.eti.pg.gda.pl)



### Streszczenie

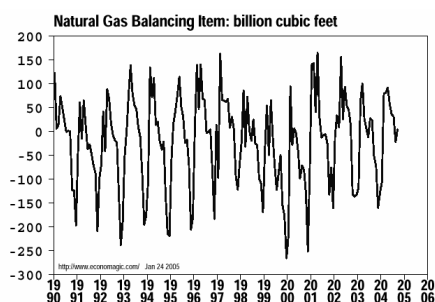
Opisano koncepcję wykorzystania teorii zbiorów rozmytych do szacowania ilości gazu dostarczanych odbiorcom przyłączonym do sieci niskiego ciśnienia. Cechy systemów dystrybucyjnych gazu powodują, że nie jest możliwe pozyskanie pełnej informacji o ilościach odebranych przez tych odbiorców. Zaproponowany sterownik rozmyty umożliwia pozyskanie dokładniejszych danych o wartości rocznych dostaw i w związku z tym może być przydatnym narzędziem także do monitorowania strat gazu.

### Abstract

The concept of using fuzzy logic theory to estimate natural gas quantity delivered to consumers connected to the low pressure network has been presented. Features of natural gas distributing systems make the whole information about consumer gas consumption is not available. The proposed fuzzy logic driver enables us to achieve more accurate data about one-year delivery and it can be also a useful tool of gas losses monitoring.

## 1. Wstęp

Jednym z głównych problemów z jakim spotyka się każde przedsiębiorstwo gazownicze jest występowanie niedomierzonych ilości gazu dostarczanych odbiorcom z sieci niskiego ciśnienia. W większości rodzajów punktów pomiarowych instalowanych w systemach gazowniczych dane o rejestrowanych przepływach dostępne są w czasie rzeczywistym dzięki zainstalowanym układom rejestrującym i systemowi telemetrii. Jednak w przypadku odbiorców pobierających gaz z sieci niskiego ciśnienia, zwykle układy pomiarowe pozbawione są zarówno czasowej rejestracji poborów jak i systemów zdalnego odczytu. Ponadto bardzo duża liczba tego rodzaju układów pomiarowych powoduje niemożliwość jednoczesnego odczytu wszystkich gazomierzy przez inkasentów w danym momencie czasu. Z tego względu ilość gazu dostarczonego tym odbiorcom można jedynie szacować. Brak danych o zużyciu gazu w danym okresie przez znaczną część odbiorców jest główną przyczyną trudności wyznaczenia strat gazu występujących w systemach dystrybucji gazu [1, 2].



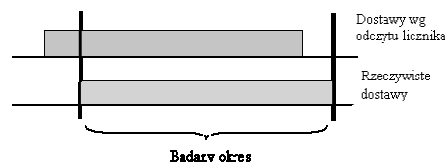
Rys. 1. Niedomierzone ilości gazu w systemie gazowniczym USA w latach 1990–2004 [3].

Na rys. 1. przedstawiono globalne niedomierzone ilości gazu systemu gazowniczego USA, wyznaczone jako różnica pomiędzy ilościami dostarczonymi i wyprowadzonymi z systemu. Niepełna informacja o zużyciu gazu przez odbiorców z sieci niskiego ciśnienia powoduje duże fluktuacje, utrudniające monitorowanie strat gazu.

Ze względu na istotne znaczenie problematyki monitorowania strat gazu dla ochrony środowiska naturalnego [4] jak i dla finansów przedsiębiorstw gazowniczych, postanowiono poszukać nowej metody oceny ilości dostarczanego gazu ziemnego odbiorcom podłączonym do sieci niskiego ciśnienia, która to metoda pozwoli otrzymywać bardziej zbliżone do rzeczywistości wyniki.

## 2. Zdefiniowanie problemu

Zagadnienie wyznaczenia ilości gazu dostarczanego odbiorcom podłączonym do sieci niskiego ciśnienia w danym okresie można sformułować jako problematykę opracowania takiego systemu badawczego, który pozwoli na wyznaczanie poszukiwanej wartości na podstawie niepełnych danych pomiarowych. Dla układów pomiarowych nie posiadających rejestracji czasowej mierzonych wartości jedynymi dostępnymi danymi pomiarowymi są stany licznika zarejestrowane podczas wizyt inkasentów u odbiorców. Okresy pomiędzy kolejnymi wizytami inkasenta, zwane również okresami rozliczeniowymi, najczęściej nie pokrywają się z badanym okresem. Ilości dostarczonego gazu wyznaczone jako różnica pomiędzy stanami licznika zarejestrowanymi podczas kolejnych odczytów gazomierza mogą z jednej strony obejmować część poborów gazu z okresu poprzedniego a z drugiej strony nie zawierać części zużycia gazu z końca badanego okresu, co zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Ilustracja wartości dostaw gazu wyznaczonych według danych na fakturach i rzeczywistych dostaw w roku kalendarzowym

Ilości dostarczonego gazu wynikające z odczytów inkasentkich odpowiadają rzeczywistej ilości dostarczonego gazu tylko w takim przypadku, gdy spełnione są następujące warunki:

- 1) cykl odczytowy jest stały, tzn. odczyty poszczególnych gazomierzy są realizowane ze stałą częstotliwością,
- 2) charakterystyka poboru pod koniec badanego i poprzedniego okresu jest identyczna (identyczne warunki pogodowe),
- 3) liczba odbiorców nie ulega zmianie,
- 4) średnia ilość poboru gazu na jednego odbiorcę nie ulega zmianie.

Oczywiście spełnienie tych warunków jest praktycznie niemożliwe i stąd konieczność poszukiwania sposobu szacowania strat na podstawie niepełnych danych pomiarowych.

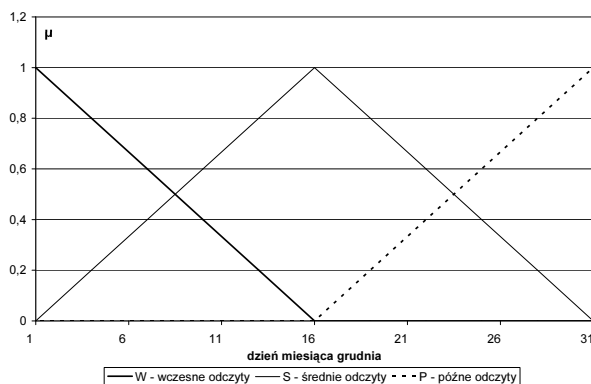
Sposób ten może bazować na różnych narzędziach badawczych, np. na analizie statystycznej, modelach analitycznych, czy metodach sztucznej inteligencji. W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania teorii zbiorów rozmytych [5, 6] jako narzędzia pozwalającego szacować ilości gazu dostarczone odbiorcom podłączonym do sieci niskiego ciśnienia. Zaproponowany sterownik rozmyty, na podstawie danych z poprzedniego i badanego okresu, koryguje ilości wyznaczone według danych zebranych przez inkasentów w taki sposób, aby otrzymać ilości jak najbliższe rzeczywistym dostawom gazu do odbiorców.

### 3. Sterownik rozmyty dokonujący korekty cyklu odczytowego

Biorąc pod uwagę fakt, że sterownik rozmyty uwzględni terminy odczytów, wskazane jest stosowanie go dla grup odbiorców jednorodnych pod względem częstotliwości odczytów. W niniejszych rozważaniach skoncentrowano się jedynie na grupie odbiorców pobierających gaz do celów grzewczych. Przyjęto, że analizowanym okresem jest rok kalendarzowy, a dane odczytowe z liczników pochodzą z ostatnich odczytów poprzedzających badany okres oraz ostatnich odczytów w badanym okresie.

Sygnałem wyjściowym sterownika jest ilość gazu o jaką należy skorygować ilość wynikającą z różnic pomiędzy odczytanymi stanami liczników. Sygnałami wejściowymi są natomiast informacje o zakończeniu odczytów w poprzednim i analizowanym roku. Przyjęto, że będą to *średni dzień*, w którym zrealizowano ostatni odczyt w roku poprzednim (DOp) i w roku bieżącym (DOb). Ze względu na to, że liczniki rozpatrywanej grupy odbiorców odczytywane są w większości przypadków co miesiąc, sygnał wejściowy powinien zawierać się w miesiącu grudniu.

Zgodnie z teorią zbiorów rozmytych, sygnały wejściowe prezentujące średni dzień grudnia, w którym zakończono odczyty, należy przekształcić na zbiory rozmyte. Przyjęto, że będą występować trzy zbiory rozmyte, którym odpowiadają pojęcia „wczesne”, „średnie” i „późne” odczyty. Na rys. 3 przedstawiono zaproponowane zbiory rozmyte dla sygnału wejściowego.

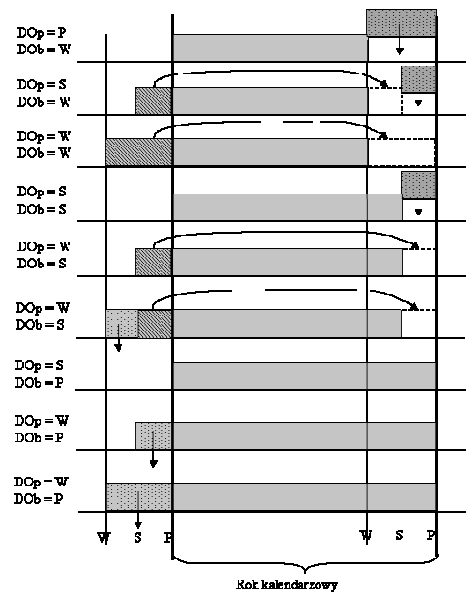


Rys. 3. Podział przestrzeni sygnałów wejściowych średni dzień ostatniego odczytu

Na osi odciętych znajdują się kolejne dni miesiąca grudnia natomiast na osi rzędnych wartość przynależności do zbiorów rozmytych. Założono, że funkcje przynależności mają kształt trójkątny i przyjmują wartości maksymalne dla następujących wartości sygnałów wejściowych:

- zbiór rozmyty „wczesne” odczyty –  $x_W = 1$ ;
- zbiór rozmyty „średnie” odczyty –  $x_S = 15,5$ ;
- zbiór rozmyty „późne” odczyty –  $x_P = 31$ .

Po zdefiniowaniu bloku rozmywania, konieczne jest opracowanie bazy reguł. Na rys. 4 przedstawiono schemat wnioskowania rozmytego.

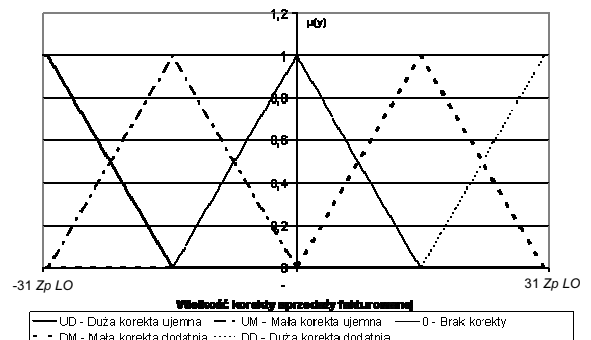


Rys. 4. Schemat graficzny wnioskowania rozmytego

Dla trzech zbiorów rozmytych, zdefiniowanych dla dwóch sygnałów wejściowych otrzymujemy dziewięć różnych reguł wnioskowania. W zależności od tego jak późno dokonano odczytu w poprzednim i bieżącym roku, w celu uzyskania wartości prezentującej rzeczywiste dostawy do odbiorców, należy na ilości wynikającej z odczytów (oznaczonej prostokątem niezakreskowanym) przeprowadzić następujące operacje:

- przenieść część lub całość zużycia grudniowego zarejestrowanego w poprzednim roku do roku bieżącego (oznaczonego zakreskowanym prostokątem),
- dodać część lub całość zużycia grudniowego do roku bieżącego (oznaczonego zakropkowanym prostokątem),
- odjąć część lub całość zużycia grudniowego roku poprzedniego (oznaczonego zakropkowanym prostokątem).

W ten sposób otrzymano pięć wynikowych zbiorów rozmytych odpowiadających następującym pojęciom „dużej ujemnej”, „małej ujemnej”, „małej dodatniej”, „dużej dodatniej” korekcie oraz „brakowi korekty”. Na rys. 5 przedstawiono proponowane funkcje przynależności tych zbiorów.



Rys. 5. Podział przestrzeni sygnału wyjściowego na obszary i odpowiadające im funkcje przynależności

Wartość środków tych obszarów wyznaczono na podstawie średnich poborów obserwowanych w grudniu według następujących zależności:

$$y_{UD} = -31 \cdot Z_p \cdot LO,$$

$$y_{UM} = -15,5 \cdot Z_p \cdot LO,$$

$$y_0 = 0,$$

$$y_{DM} = 15,5 \cdot Zb \cdot LO,$$

$$y_{DD} = 31 \cdot Zb \cdot LO,$$

gdzie:

$Zp$  - średnie zużycie odbiorców w grudniu roku poprzedniego,

$Zb$  - średnie zużycie odbiorców w grudniu roku bieżącego,

$LO$  - liczba odbiorców.

Uwzględniając zdefiniowane powyżej wejściowe i wyjściowe zbiory rozmyte, bazę reguł można przedstawić za pomocą tabeli (tab. 1). Każdej parze wejściowych zbiorów odpowiada jeden zbiór wyjściowy.

Tab. 1. Baza reguł dla korekty cyklu odczytowego

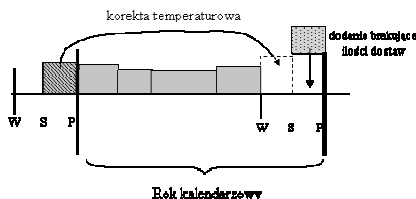
DOP	P	DD	DM	0
	S	DM	0	UM
	W	0	UM	UD
		W	S	P
DOb				

Do pełnego skonstruowania sterownika rozmytego należy ponadto określić metodę wnioskowania oraz metodę precyzowania. W rozpatrywanym przykładzie zastosowano najczęściej używane metody tj. odpowiednio metodę implikacji typu minimum i metodę CAD (center average defuzzification) [5].

#### 4. Uzupelnienie sterownika o dodatkowe zmienne wejściowe

W powyższych analizach nie rozpatrywano wpływu temperatury, zmiany liczby odbiorców czy też trendów zmiany sprzedaży. Aby uwzględnić wpływ wszystkich czynników należy wprowadzić dodatkowe zmienne wejściowe oraz zmodyfikować bazę reguł oraz postać wyjściowych zbiorów rozmytych. Dalsze rozważania ograniczono jedynie do kwestii różnicy temperatur pomiędzy poprzednim i bieżącym rokiem, gdyż czynnik ten ma największe znaczenie w przypadku odbiorców wykorzystujących gaz do celów grzewczych. W związku z tym należy zastosować uproszczenie zakładające, że liczba odbiorców jak i zależność poboru gazu od temperatury nie ulegają zmianie od poprzedniego roku.

Analogicznie do rozważań zaprezentowanych na rys. 4 można zauważyć, że oprócz konieczności dokonywania korekty wartości dostaw otrzymanej z faktur, do bardziej poprawnego wyznaczania rzeczywistych dostaw gazu konieczna jest również temperaturowa korekta dostaw grudniowych. Zagadnienie to zostało przedstawione na rys. 6 dla przykładowego zestawienia danych wejściowych.

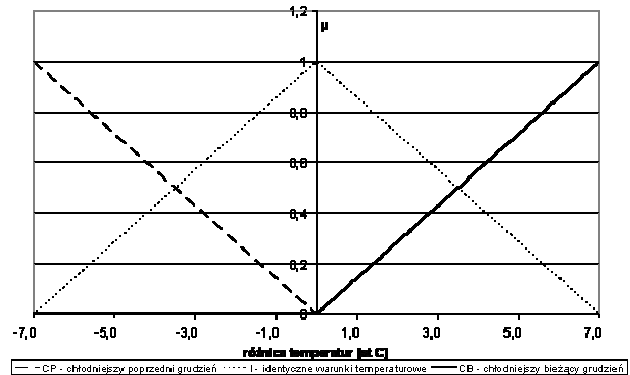


Rys. 6. Graficzna interpretacja korekt cyklu odczytu i różnicy warunków temperaturowych

W przypadku wczesnych odczytów w badanym roku i średnich odczytów w roku poprzednim, oprócz konieczności dodania dostaw gazu w drugiej połowie grudnia w roku badanym, należy uwzględnić różne warunki pogodowe mające przełożenie na wartość dostaw w pierwszej połowie tego miesiąca.

Aby zaimplementować korektę dostaw gazu pod wpływem temperatury powietrza, należy wprowadzić dodatkowy sygnał wejściowy określającą różnicę temperatur pomiędzy grudniem poprzedniego roku a grudniem roku bieżącego. Na rys. 7 zilustrowano zaproponowany charakter zbiorów rozmytych dla tego

sygnału. Przestrzeń tego obszaru podzielono na trzy obszary odpowiadające pojęciom „chłodniejszy poprzedni grudzień”, „identyczne warunki temperaturowe”, „chłodniejszy bieżący grudzień”. Środki zbiorów rozmytych uzyskano na podstawie wieloletnich obserwacji zmienności temperatur powietrza występujących w grudniu.



Rys. 7. Podział przestrzeni sygnału wejściowego różnica temperatur

Wprowadzenie nowej zmiennej wejściowej powoduje konieczność dodania nowych ośmiu zbiorów rozmytych do już istniejących pięciu zbiorów rozmytych sygnału wyjściowego. Środki tych zbiorów wyznaczono na podstawie poniższych wzorów:

$$y_{UMT-} = y_{UM} - K_M,$$

$$y_{UMT+} = y_{UM} + K_M,$$

$$y_{0T-} = y_0 - K_M,$$

$$y_{0T+} = y_0 + K_M,$$

$$y_{0T--} = y_0 - K_D,$$

$$y_{0T++} = y_0 + K_D,$$

$$y_{DMT-} = y_{DM} - K_M,$$

$$y_{DMT+} = y_{DM} + K_M$$

gdzie:

$K_M$  - mała korekta temperaturowa wyrażona wzorem

$$K_M = 15,5 \cdot k \cdot \Delta T \cdot LO,$$

$K_D$  - duża korekta temperaturowa wyrażona wzorem

$$K_D = 31 \cdot k \cdot \Delta T \cdot LO,$$

$\Delta T$  - maksymalna różnica średnich temperatur w miesiącu grudniu w poszczególnych latach,

$k$  - średni współczynnik zależności dobowego poboru gazu od temperatury dla jednego odbiorcy z grupy taryfowej,  $LO$  - liczba odbiorców w grupie taryfowej.

Natomiast baza reguł przyjmie postać zaprezentowaną w tab. 2.

Tab. 2. Baza reguł sterownika rozmytego przy uwzględnieniu cyklu odczytowego i różnych warunków temperaturowych

DOP	P	DD			DM			0		
	S	DMT-	DM	DMT+	0T-	0	0T+	UM		
	W	0T--	0	0T++	UMT-	UM	UMT+	UD		
		CP	I	CB	CP	I	CB	CP	I	CB
		W			S			P		
DOb										

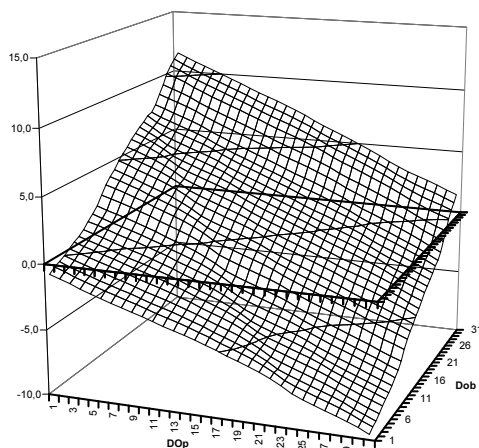
W przypadku identycznych warunków pogodowych baza reguł ma postać identyczną z poprzednią wersją uwzględniającą jedynie korektę ze względu na cykle odczytowe odbiorców. Różne warunki pogodowe w grudniu roku badanego i poprzedniego powodują dodatkową „korektę temperaturową”.

## 5. Analiza poprawności działania sterownika rozmytego

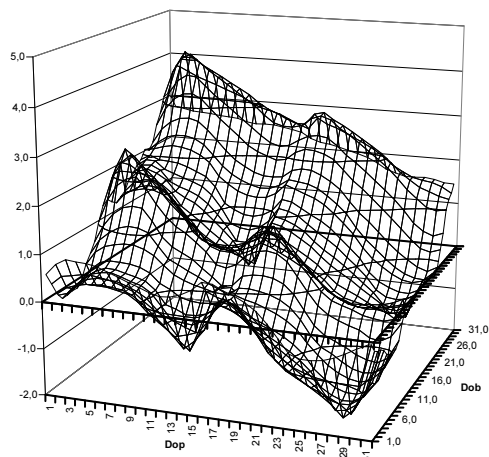
W celu zbadania poprawności opracowanego sterownika rozmytego, którego główne właściwości zostały określone *a-priori*, przeprowadzono analizę symulacyjną opierając się na danych zgromadzonych z pomiarów za pomocą gazomierzy miechowych z czasową rejestracją poboru 6G4ES [7], zainstalowanych u 189 losowo wybranych odbiorców gazu. Podczas analiz zasymulowano różne terminy odczytów przeprowadzonych w grudniu poprzedniego i badanego roku. Uwzględniono również różne warunki pogodowe panujące w tych miesiącach.

Na rys. 8 przedstawiono niedomierzone ilości gazu w przypadku wyznaczania dostaw gazu do odbiorców na podstawie różnic pomiędzy odczytanymi stanami liczników. Dane te przedstawiono w zależności od terminu odczytów liczników w poprzednim i bieżącym roku.

Otrzymany wykres przestrzenny wskazuje, że wraz ze wzrostem różnic pomiędzy datami odczytów w miesiącach grudniowych następuje wzrost wartości niedomierzonych ilości gazu. Ponadto warto zauważyć, że obserwowane falowanie powierzchni uwidocznia zmienność zużycia gazu powodowaną głównie zmiennymi warunkami pogodowymi.



Rys. 8. Niedomierzone ilości gazu w przypadku szacowania dostaw na podstawie różnic pomiędzy stanami liczników w poprzednim i bieżącym roku



Rys. 9. Niedomierzone ilości gazu w przypadku zastosowania sterownika rozmytego

Z kolei na rys. 9 przedstawiono niedomierzone ilości gazu w przypadku zastosowania sterownika rozmytego. Zastosowanie zaproponowanej metody spowodowało zmniejszenie wartości niedomierzonych ilości gazu około trzykrotnie. Jest to dobry rezultat z uwagi na przyjęcie założeń do opracowania sterownika jedynie na podstawie wiedzy eksperckiej pracowników przedsiębiorstwa gazowniczego. Niewątpliwie dokładniejsze sprecyzowanie tych założeń, w szczególności w zakresie funkcji przynależności zbiorów wejściowych i wyjściowych, na podstawie dodatkowych analiz i badań, poprawi dokładność metody.

## 6. Podsumowanie

Przedstawiona koncepcja budowy sterownika rozmytego może być interesującym narzędziem pozwalającym na szacowanie rzeczywistych ilości gazu dostarczonych odbiorcom domowym. Możliwe jest dalsze rozwijanie metody poprzez modyfikacje funkcji przynależności oraz wprowadzenie dodatkowych sygnałów wejściowych, np. korygujących wpływ zmiany liczby odbiorców, czy wpływ zmiany średniego zużycia gazu. Ponadto w dalszych pracach można rozważyć stworzenie sterownika rozmytego wyznaczającego straty gazu, który uwzględniłby nieprecyzyjne wielkości wpływające na różnicę bilansową np.:

- „zwiększenie liczby stwierdzonych emisji gazu z sieci”,
- „przeprowadzenie remontu sieci gazowej”,
- „zaobserwowanie zwiększonej liczby kradzieży”,
- „przeprowadzenie wymiany gazomierzy”.

Główną cechą tej metody, zachęcającej do dalszych prac, jest możliwość rozwiązywania problemów, dla których nie są znane rozwiązania oparte na klasycznych algorytmach obliczeniowych. Nie jest również konieczna dokładna znajomość zależności pomiędzy zdarzeniami występującymi w sieci dystrybucyjnej a ilością traconego gazu. Stosując logikę rozmytą uwzględnia się także wiedzę ekspercką doświadczonych pracowników. Zaletą jest względnie niskie obciążenia obliczeniowe metody jak i możliwość uzyskiwania wyniku w krótkim czasie.

Na zakończenie warto również podkreślić, że przedstawione rozważania oceny ilości gazu rzeczywiście dostarczonej odbiorcom, którzy nie posiadają układów pomiarowych z czasową rejestracją poboru, ma istotne znaczenie także w aspekcie liberalizacji rynku gazu. Nowe regulacje powodują konieczność wypracowania mechanizmów pozwalających rozdzielać strumienie występujące w danym systemie dystrybucyjnym pomiędzy różnych sprzedawców gazu. Niewątpliwie mechanizmy te nie obędą się bez rozwiązań szacujących ilości dostarczone drobnym odbiorcom.

## 7. Literatura

- [1] Meshkati SG, Groot JM. A study of Unaccounted-For Gas At The Southern California Gas Company. International Workshop Environmental and Economic Impacts of Natural Gas Losses; Praga; 1994.
- [2] Cowgill RM. Methane Emissions – leakage, sources, and unaccounted for gas. IGT Asian Natural Conference III; Singapur; 1991.
- [3] Economic Time Series Page; www.economagic.com (24.01.2005).
- [4] Molenda J, Steczko K. Ochrona środowiska w gazownictwie i wykorzystaniu gazu. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2000.
- [5] Rutkowska D, Piliński M, Rutkowski L. Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN; 1997.
- [6] Duch W, Korbicz J, Rutkowski L, Tadeusiewicz R. Sieci Neuronowe. Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna (pod redakcją Nałęcz M). Tom 6: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT; 2000.
- [7] Łętowski S., Słomiński P. Gazomierz miechowy z liczytłem elektronicznym jako narzędzie w badaniach nierozliczonych ilości gazu u odbiorców domowych. Nowoczesne Gazownictwo 1999; 3 (IV).

**Title:** Application of fuzzy logic theory to determine gas delivery in low-pressure distribution networks