

Bilansowanie systemu przesyłowego w jednostkach energii z wykorzystaniem symulacji stanów nieustalonych

Transmission system balancing in energy units using transient simulation

Stanisław Brzęczkowski, Andrzej J. Osiadacz^{*)}

Słowa kluczowe: symulacja dynamiczna, bilansowanie systemu gazowego, bilans energetyczny, bilans handlowy

Streszczenie

W artykule omówiono rolę symulacji dynamicznej w bilansowaniu gazowego systemu przesyłowego w jednostkach energii.

Keywords: dynamic simulation, gas system balancing, energy balance, trade balance

Abstract

This paper discusses the role of dynamic simulation in balancing the gas transmission system in energy units.

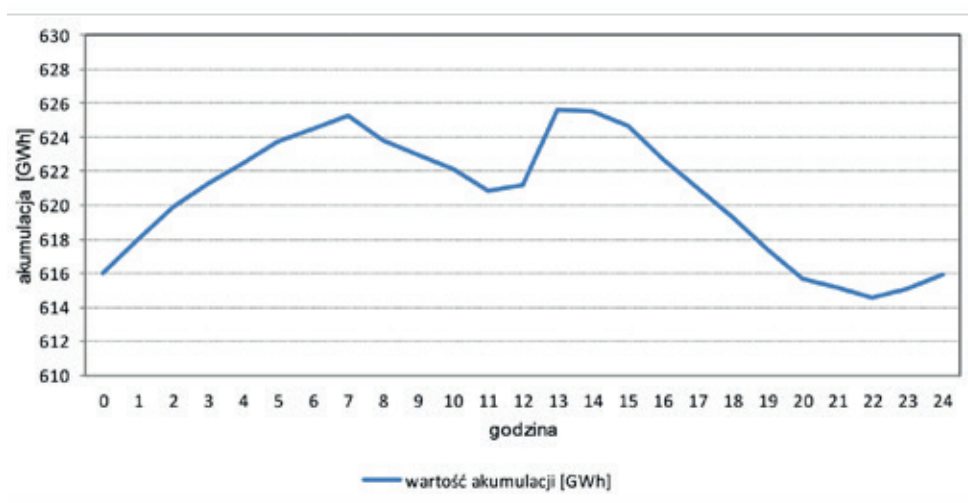
1. Wstęp

Liberalizacja rynku gazowniczego w Europie powoduje, że na skutek wzrostu konkurencji rośnie poziom usług związanych z obrotem gazem. W efekcie niezależni operatorzy systemów dystrybucyjnych i przesyłowych są zainteresowani wyższą dokładnością pomiarów ilości i jakości gazu. Przeciętnego odbiorcę gazu interesuje nie objętość gazu, lecz energia. Zatem przedmiotem handlu i przesyłu staje się energia. Powoduje to, że rozliczanie przesyłania w jednostkach energii staje się koniecznością. Dodatkowo takie podejście umożliwia wyeliminowanie aspektów jakościowych w umowach związanych z obrotem paliwem gazowym. Wartość kaloryczna, tak jak i inne parametry jakościowe gazu, stają się wyłącznie jednym z elementów działalności operatorów systemów przesyłowych i dystrybucyjnych oraz ich wzajemnych

relacji. Zatem, jako główną przyczynę przygotowywania takiej formy rozliczeń usług przesyłowych, można uznać chęć spełnienia oczekiwań uczestników rynku a także spełnienie wymogów obowiązujących przepisów prawa.

2. Bilansowanie energii

Bilansowanie energetyczne systemu przesyłowego przez operatora oparte jest na zachowaniu ilości energii zakumulowanej w sieci przesyłowej, w granicach zapewniających ciągłą pracę systemu przesyłowego. Stanem idealnym jest utrzymanie wartości akumulacji na stałym poziomie. Zmienność poborów w punktach wyjścia, a także zmienność jakości gazu w punktach wejścia, powoduje, że ilość energii w sieci ulega pewnym wahaniom. Ze



Rys. 1. Przykładowy dobowy przebieg wartości energii zakumulowanej w sieci
Fig.1. Graph of example of energy line-pack hourly profile

* Stanisław Brzęczkowski, dr inż., Gaz System S.A; Andrzej J. Osiadacz, prof. dr hab. inż., Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, e-mail: andrzej.osiadacz@pw.edu.pl

względu na to, że ilość energii odbieranej w punktach wyjścia wynika z zapotrzebowań poszczególnych odbiorców, narzędziem umożliwiającym zapewnienie zbilansowania sieci dla operatora w perspektywie średnio i długoterminowej jest wyłącznie odpowiednie sterowanie źródłami. W perspektywie krótkoterminowej (w trakcie trwania doby) podstawowym środkiem, zapewniającym elastyczność systemu, jest energia zakumulowana w sieci. Przykładowy wykres zmian w trakcie doby energii zakumulowanej w sieci przesyłowej przedstawiono na rys. 1.

W sytuacji realizacji usług przesyłu w jednostkach energii, bilansowanie stanu sieci również dokonywane jest w jednostkach energii.

Bilans energetyczny systemu można opisać następującą zależnością:

$$B_E(t) = E_{we}(t) - E_{wy}(t) - E_{pt}(t) + \frac{\partial E_A(t)}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie:

$B_E(t)$ – bilans energetyczny systemu w chwili t [MJ],

$E_{we}(t)$ – strumień energii wpływający do systemu w chwili t [MJ],

$E_{wy}(t)$ – strumień energii wypływający z systemu w chwili t [MJ],

$E_{pt}(t)$ – potrzeby technologiczne systemu w chwili t [MJ],

$E_A(t)$ – energia zakumulowana w systemie w chwili t [MJ].

Dla dowolnego okresu czasu (Δt) wartość bilansu energetycznego (różnicy bilansowej) (RB_E) otrzymujemy poprzez scałkowanie zależności (1) w przedziale t_0 do t_1 . Otrzymujemy następującą zależność:

$$RB_E(\Delta t) = \int_{t_0}^{t_1} B_E(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} E_{we}(t) dt - \int_{t_0}^{t_1} E_{wy}(t) dt - \int_{t_0}^{t_1} E_{pt}(t) dt + (E_A(t_1) - E_A(t_0)) \quad (2)$$

W idealnym przypadku różnica bilansowa wynosi zero. W praktyce jest ona różna od zera. Jej wartość wynika z niepewności określania ilości gazu wprowadzanych i odprowadzanych z systemu. Przy określaniu ilości gazu odprowadzanych należy również uwzględnić zewidencjonowane ilości zużyte na potrzeby technologiczne operatora.

3. Akumulacja energii w systemie przesyłowym

Czynnikiem wpływającym na różnicę bilansową jest także zmiana ilości energii zakumulowanej w sieci. Jej wartość określana jest poprzez porównanie stanów akumulacji energii na początku i końcu analizowanego okresu.

Ilość energii zakumulowana w systemie jest określana w oparciu o geometrię systemu oraz rozkład ciśnienia i wartości ciepła spalania wzdłuż poszczególnych elementów sieci. Jest to suma ilości energii zawartych w poszczególnych gazociągach. Energię zgromadzoną w pojedynczym gazociągu w chwili t określa się na podstawie następującej zależności:

$$E_{Agi}(t) = \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{273,15}{0,1013} \int_0^l \frac{z(x,t) p(x,t)}{z(x,t) T(x,t)} C_v(x,t) \cdot dx \quad (3)$$

gdzie:

E_{Agi} – ilość energii zakumulowana w odcinku gazociągu [MJ],

d_i – średnica wewnętrzna odcinka gazociągu [m],

$p(x,t)$ – ciśnienie gazu jako funkcja zmiennej przestrzennej i czasu [MPa],

$z(x,t)$ – współczynnik ściśliwości gazu,

$z_n(x,t)$ – współczynnik ściśliwości gazu w warunkach normalnych,

$T(x,t)$ – temperatura gazu [K].

$C_v(x,t)$ – ciepło spalania [MJ/m³].

Metoda obliczania akumulacji energii w poszczególnych odcinkach systemu przesyłowego, wyłącznie na podstawie pomiarów jakości gazu w wybranych punktach sieci, byłaby skomplikowana i kosztowna. Zastosowanie algorytmów symulacji dynamicznej pozwala na efektywne dokonanie odpowiednich obliczeń. W prostszych systemach bywają one uproszczone poprzez uśrednienie ciśnienia i kaloryczności na podstawie wartości na początku i końcu elementu dyskretyzacji danego odcinka gazociągu. [3,6]

Dla całego systemu akumulacja określana jest jako suma akumulacji dla poszczególnych odcinków sieci i określana jest według zależności:

$$E_A = \sum_{i=1}^n E_{Agi} \quad (4)$$

gdzie:

E_A – ilość energii zakumulowana w całym systemie [MJ],

n – ilość odcinków gazociągów w systemie.

Tak określona wartość akumulacji systemu dla początku i końca analizowanego okresu pozwala określić jej zmianę, która wraz z określonymi ilościami w punktach wejścia i wyjścia oraz zużyciami technologicznymi, stanowi komplet informacji pozwalający określić bilans energetyczny systemu.

4. Bilans handlowy a bilans fizyczny

Przy bilansowaniu sieci przesyłowej w jednostkach energii, określany jest również energetyczny bilans handlowy systemu przesyłowego. Uwzględnia on ilości przekazane operatorowi (E_{INz}) lub przez niego oddane (E_{INs}), w wyniku rozliczeń niezbilansowania poszczególnych umów, ilości zakupione (E_{kpt}) i zużyte (E_{pt}) na potrzeby technologiczne operatora, ilości odebrane (E_{Mo}) lub zatłoczone (E_{Mz}) do pojemności magazynowych, będących w dyspozycji operatora, a także zmianę wartości konta operatorskiego (E_{OBA}) z operatorami współpracującymi oraz zmianę akumulacji (E_A) w systemie. Równanie służące do określania bilansu handlowego operatora sieci przesyłowej dla określonego przedziału czasu ma postać:

$$(E_{INz} - E_{INs}) + (E_{kpt} - E_{pt}) + (E_{Mo} - E_{Mz} - \Delta E_A) + \Delta E_{OBA} = RB_E \quad (5)$$

Wartości poszczególnych elementów określone są w następujący sposób:

- energia przekazana operatorowi przez klientów (E_{INz}) w wyniku rozliczeń niezbilansowania – jest to energia przekazana przez klientów umów przesyłowych w wyniku rozliczenia dodatniego niezbilansowania;*
- energia przekazana przez operatora klientom (E_{INs}) w wyniku rozliczeń niezbilansowania – jest to energia przekazana do klientów umów przesyłowych, w wyniku rozliczenia ich ujemnego niezbilansowania;
- energia zakupiona (E_{kpt}) – energia, która została zakupiona i wprowadzona do systemu przesyłowego w danym okresie na potrzeby własne operatora;

- energia odebrana (E_{M0}) lub zatłoczona (E_{Mz}) do pojemności magazynowych będących w dyspozycji operatora;
- zmiana ilości energii zakumulowanej w systemie (ΔE_A) – jest to energia, o którą zwiększyła się lub zmniejszyła całkowita ilość energii znajdująca się w objętości sieci przesyłowej;
- zmiana wartości konta operatorskiego (E_{OBA}) – są to ilości wynikające ze zmiany wartości ilości energii na koncie operatorskim, wykorzystywanym przy realizacji umów, odpowiadającej nominacjom w punktach połączeń pomiędzy współpracującymi operatorami systemów przesyłowych.

Czynnikiem domykającym jest element uwzględniający dokładność wyznaczenia wszystkich wymienionych powyżej elementów składowych bilansu fizycznego. Nazywany jest on „różnicą bilansową” (RB_E).

Wartości różnicy bilansowej określanej według zależności (2) i (5) są sobie równe. Pozwala to sformułować równanie ukazujące zależność pomiędzy elementami bilansu handlowego systemu i bilansem fizycznym systemu. Dla bilansowania sieci przesyłowej w jednostkach energii ma ono następującą postać:

$$(E_{INz} - E_{INs}) + E_{zpt} + (E_{M0} - E_{Mz}) + \Delta E_{OBA} = \sum_{i=1}^n E_{WEI} - \sum_{j=1}^n E_{WYJ} \quad (6)$$

Równanie to ukazuje powiązanie pomiędzy niezbilansowaniami poszczególnych umów przesyłowych a działaniami operatora, w celu zachowania równowagi energetycznej sieci przesyłowej.

W efekcie, gdy niezbilansowania handlowe poszczególnych umów wzajemnie się znoszą, nie powoduje to konieczności interwencji operatora, o ile zachowany jest stabilny rozkład ciśnień w systemie. W przeciwnym przypadku, konieczna jest interwencja operatora. W takich sytuacjach niezbędne jest wykorzystanie odpowiedniego oprogramowania, w celu wyznaczenia odpowiedniego algorytmu sterowania systemem przesyłowym i wykorzystania odpowiednich środków technicznych i rynkowych. Jednocześnie należy pamiętać, że utrzymanie ciągłości dostaw przez system przesyłowy, wymaga również utrzymania określonych wartości ciśnienia w wybranych punktach sieci przesyłowej. Zatem sterowanie źródłami musi zapewnić, zarówno stabilność zakumulowanej energii, jak i odpowiedni poziom ciśnień w systemie. W przypadku zmian jakości paliwa gazowego dostarczanego do systemu, może wystąpić niezbilansowanie wynikające z przesunięcia w czasie jakości gazu wpływającego i wpływającego do/z systemu przesyłowego. Może ono powodować niezbilansowanie energetyczne, mimo utrzymania odpowiednich wartości ciśnień. Może także powodować zmianę akumulacji objętościowej, przy zachowanym bilansie energetycznym. Z tego względu sterowanie źródłami musi uwzględniać, zarówno zmiany akumulacji energii, jak i objętości gazu w sieci przesyłowej. Strumienie energii i objętości na wejściach bilansowanego systemu opisuje następujący układ równań:

$$\sum_{i=1}^n Q_{we i}(\Delta t) = \Delta V_{AK}(\Delta t) - \sum_{j=1}^m Q_{wy j}(\Delta t) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n E_{we i}(\Delta t) = \Delta E_A(\Delta t) - \sum_{j=1}^m E_{wy j}(\Delta t) \quad (8)$$

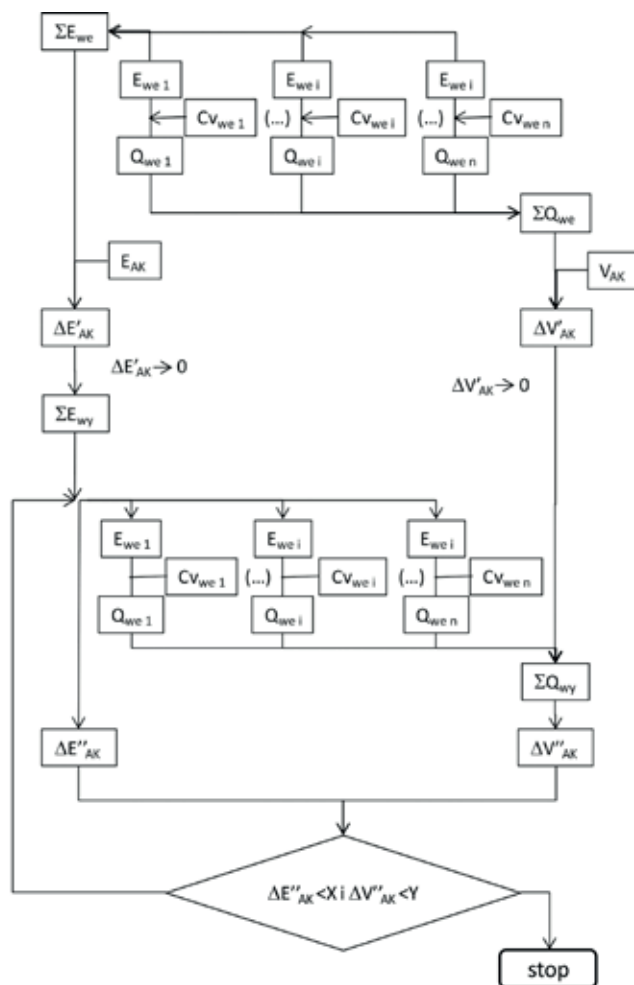
$$Q_{we i}(\Delta t) = \frac{E_{we i}(\Delta t)}{CV_{we i}(\Delta t)} \quad (9)$$

$$E_{wy j}(\Delta t) = Q_{wy j}(\Delta t) \cdot CV_{wy j}(\Delta t) \quad (10)$$

$$\Delta V_{AK}(\Delta t) \rightarrow 0 \quad (11)$$

$$\Delta E_A(\Delta t) \rightarrow 0 \quad (12)$$

gdzie wartości zmian akumulacji energii (oraz zmian akumulacji objętości) są obliczane odpowiednio według zależności (1) oraz (4). Prognozowane wartości strumieni energii ($E_{we i}(\Delta t)$) operatorzy pozyskują bądź z informacji od użytkowników systemu lub też dla punktów wyjścia, związanych z odbiorcami nielimitowanymi (gospodarstwa domowe) z algorytmów prognozy. Przewidywany strumień objętości dla punktów wyjścia ($Q_{wy j}(\Delta t)$) określany jest na podstawie ilości energii i wartości ciepła spalania gazu w danym źródle. Natomiast wartości dla punktów wejścia uzyskiwane są w wyniku procesu, którego przebieg został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Algorytm określania wartości strumieni objętości i energii w punktach wejścia dla systemu przesyłowego w celu utrzymania systemu w stanie zbilansowanym energetycznie i objętościowo

Fig.2 Algorithm of determination of entry flow of volume and energy for keeping system balanced in volume and energy

W trakcie realizacji tej procedury, ze względu na złożoność sieci przesyłowej oraz dynamikę odbiorów, wartości obu wspomnianych akumulacji określane powinny być z wykorzystaniem symulacji dynamicznych. Pozwala to w sposób rzetelny uwzględnić rozkład ciśnień oraz kaloryczności gazu w sieci. W zakresie sterowania źródłami, praca części z nich wynika z informacji lub możliwości użytkowników systemu przesyłowego. Zatem podstawowymi źródłami, które mogą być wykorzystywane do bilansowania sieci, są połączenia z instalacjami magazynowymi. Źródła te cechują się znaną, i w znakomitej większości, stabilną kalorycznością gazu. Dodatkową zaletą tych źródeł jest to, że w zakresie niezbędnym do utrzymania bilansu sieci, podlegają

one bezpośrednio sterowaniu przez operatora sieci przesyłowej, na podstawie odpowiednich porozumień międzyoperatorских, zawartych przez operatora sieci przesyłowej i operatora systemów magazynowych. W sytuacji, gdy dyspozycyjność dla operatora tych źródeł jest zbyt mała, dla zachowania ciągłości dostaw sieci przesyłowej, niezbędna jest współpraca z podmiotami dostarczającymi gaz do sieci. W takich przypadkach jest ona oparta na zasadach umownych, poprzez transakcje związane z usługami systemowymi dokonywanymi na platformie rynku bilansującego [11]. Narzędzie to jest stosowane, gdy niezbędne są działania wykraczające poza elastyczność wynikającą z współpracy z instalacjami magazynowymi.

5. Energia dostarczana i odbierana z systemu

Wyznaczanie energii przekazywanej do systemu przesyłowego, a także z niej odbieranej, jest niezbędne, aby móc określić realizację umów przesyłowych rozliczanych w jednostkach energii. Dla gazu ziemnego energia ta określana jest na podstawie wartości objętości oraz wartości ciepła spalania przekazywanego medium. Ogólny wzór na określenie energii w danym okresie czasu przedstawia zależność:

$$E = \sum_i (V_i \cdot CV_i) \quad (13)$$

gdzie:

E – energia określona dla danego okresu [MJ],

V_i – objętość w i-tym okresie, dla którego przyjęto stałą wartość ciepła spalania [m^3],

CV_i – wartość ciepła spalania w i-tym okresie [MJ/m^3].

Do wyznaczenia energii potrzebne jest określenie, zarówno objętości jak i wartości ciepła spalania w danym okresie. Metody określania objętości gazu omówiono w [1, 9, 2]. Poniżej omówione zostaną metody, związane z wyznaczeniem wartości ciepła spalania, a także strumienia i ilości energii.

Definicja ciepła spalania jest następująca: *„Ilość energii, która zostałaby wydzielona na sposób ciepła w wyniku całkowitego i zupełnego spalania w powietrzu 1 m^3 paliwa gazowego w warunkach normalnych, gdyby reakcja zachodziła pod stałym ciśnieniem absolutnym 101,325 kPa wszystkie, oprócz wody, produkty spalania były w stanie gazowym, para wodna utworzona w procesie spalania uległa kondensacji i wszystkie produkty spalania (zarówno produkty w stanie gazowym jak i woda w stanie ciekłym) zostały doprowadzone do temperatury 25°C”.* [11]

Zgodnie z zależnością (15) do określenia energii w punkcie wyjścia lub wejścia, niezbędne są informacje o objętości gazu przekazywanego w poszczególnych przedziałach czasu oraz o wartościach ciepła spalania. Ze względu na dotychczasową praktykę rozliczeń, pomiar objętości jest procesem realizowanym w sposób ciągły, na wszystkich punktach wejścia i wyjścia. Do rozliczeń usług i bilansowania wykorzystywane są ilości godzinowe, dobowe i miesięczne. Drugim czynnikiem, niezbędnym do określenia energii, jest ciepło spalania. Z przyczyn historycznych a także ekonomicznych, pomiar jakości gazu nie jest dokonywany we wszystkich punktach wejścia i wyjścia. Sytuacja ta powoduje, że przypisanie wartości ciepła spalania do poszczególnych punktów a także okresów, dokonywane jest w sposób, który stanowi kompromis pomiędzy dokładnością wyznaczenia wartości a możliwościami technicznymi. Najczęściej stosowane są wartości średnie

dobowe lub miesięczne. Obecnie do celów rozliczeniowych, jako parametr jakościowy przesyłanego paliwa gazowego, a także w obrocie, wykorzystywana jest wartość średniomiesięczna. Ze względu na przyjęcie doby jako podstawowego okresu rozliczeniowego przesyłu, praktyka przemysłowa będzie zapewne dążyć do wykorzystywania średniej wartości dobowej. W efekcie energia określana dla danej doby, na poszczególnym punkcie wejścia lub wyjścia, stanowi iloczyn objętości i określonej dla danej doby wartości średniej dobowej ciepła spalania. Wartości miesięczne stanowią odpowiednie sumy dobowych ilości energii.

Określenie wartości ciepła spalania, we wszystkich punktach wejścia i wyjścia systemu przesyłowego, jest niezbędne dla określenia energii przekazywanego gazu. Przy wyborze sposobu określania wartości kalorycznej, należy uwzględnić, że gaz ziemny stanowi mieszaninę zarówno węglowodorów jak i gazów niemających wartości kalorycznej a także jest gazem rzeczywistym. Wartość ciepła spalania mieszaniny określona dla podanych warunków, określa się według następującej zależności:

$$CV_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot CV_{oi} \cdot \frac{p_n}{R \cdot T_n}}{Z_{mix}(p_n, T_n)} \quad (14)$$

gdzie:

CV_{mix} – wartość ciepła spalania mieszaniny odniesiona do jednostki objętości w warunkach normalnych [MJ/m^3],

x_i – udział molowy i-tego składnika w mieszaninie,

CV_{oi} – ciepło spalania odniesione do mola i-tego składnika traktowanego jako gaz doskonały wg [9] [kJ/mol],

p_n – ciśnienie odniesienia dla określenia 1 m^3 spalanego składnika równe 101,325 kPa,

T_n – temperatura odniesienia dla określenia 1 m^3 spalanego składnika równa 273,15 K,

R – stała gazowa – 8,314510 [$J/(mol \cdot K)$],

$Z_{mix}(p_n, T_n)$ – współczynnik ściśliwości mieszaniny w warunkach p_n i T_n ,

k – ilość składników mieszaniny.

Ze względu na to, że molowe ciepła spalania oraz wartości współczynnika ściśliwości, w warunkach normalnych poszczególnych składników, są znane i umieszczone w normach krajowych i międzynarodowych, głównym zadaniem staje się rzetelne określenie składu gazu w poszczególnych punktach systemu przesyłowego. Może ono być realizowane poprzez wykorzystanie odpowiednich urządzeń pomiarowych – w tym przypadku gazowych chromatografów procesowych – lub też przy użyciu odpowiednich metod symulacyjnych. W warunkach laboratoryjnych do wyznaczenia wartości kalorycznej stosowane są również dedykowane urządzenia nazywane kalorymetrami. Jednak z powodów konstrukcyjnych nie są one stosowane w warunkach pracy stacji gazowych.

6. Wykorzystanie programów symulacyjnych do obliczania ciepła spalania

Programy symulacyjne pozwalają określić wartości ciepła spalania w dowolnym punkcie sieci. Umożliwiają znajomość aktualnego lub archiwalnego rozkładu kaloryczności w systemie. W zależności od okresu, dla którego określane są te wartości, wykorzystywany jest inny rodzaj symulacji. Dla danych dotyczących czasu minionego istnieją dwie metody.

Pierwszą z nich są obliczenia odtwarzające pracę systemu w przeszłości, na podstawie danych archiwalnych o pracy systemu i jakości paliwa gazowego w punktach wejścia. Obliczenia takie pozwalają określić wartości ciepła spalania w całej sieci, z przedziałem czasowym wynikającym z odpowiednio przyjętych parametrów obliczeń symulacyjnych lub parametrów prezentacji wyników obliczeń. Najczęściej okres prezentacji wyników waha się od 3 do 5 minut.

Drugą z nich jest informacja o aktualnym rozkładzie wartości kalorycznych w sieci, wynikająca z ostatnich wyników obliczeń wykonywanych na bieżąco. Takie obliczenia możliwe są, gdy system obliczeniowy jest zintegrowany z systemem SCADA, w którym na bieżąco dostępna jest informacja, zarówno o aktualnej jakości w źródłach, ale przede wszystkim o aktualnych ciśnieniach i rozpyłach gazu w sieci i parametrach pracy elementów regulacyjnych. Obliczenia takie najczęściej wykonywane są w cyklu 5 minutowym. Zarchiwizowane wyniki takich obliczeń stanowią źródło informacji o rozkładzie kaloryczności gazu w sieci w przeszłości.

Dysponując informacją o przepływach, rozkładach ciśnień i kaloryczności w sieci w funkcji czasu oraz odpowiednim modelem, możliwe jest wykorzystanie wyników do rzetelnego określenia ilości energii zakumulowanej w sieci, uwzględniając nie tylko rozkład gęstości, ale również i wartości energetycznych. Wyniki obliczeń pozwalają w sposób rzetelny określać ilości przekazywane w punktach wyjścia w jednostkach energii, bez potrzeby instalowania urządzeń do pomiaru składu gazu w każdym z tych punktów.

Tego typu obliczenia pozwalają na zastąpienie konieczności instalacji układów pomiarowych określających wartość kaloryczną paliwa gazowego (gazowych chromatografów procesowych) w punktach wyjścia z systemu. Narzędzia symulacyjne pozwalają określić wartość ciepła spalania w dowolnym punkcie systemu przesyłowego z określoną dokładnością. Takie rozwiązanie pozwala na określenie energii, która jest przekazywana w punktach wyjścia z systemu, a następnie na dokonanie odpowiednich rozliczeń energetycznych umów i całego systemu. Przy określaniu bilansu systemu, obliczenia te umożliwiają określenie energii zawartej w systemie (akumulacji systemu określonej w jednostkach energii), z uwzględnieniem rozkładu przestrzennego w sieci, zarówno ciśnień jak i parametrów jakościowych wraz z ciepłem spalania paliwa gazowego.

Obliczenia symulacyjne *on-line* są niezbędne do sterowania pracą systemów, które cechuje zmienność parametrów jakościowych. Systemy do obliczeń bieżących są wyposażone w moduły, pozwalające na analizy prognostyczne, dotyczące zarówno rozkładów ciśnień jak i kaloryczności gazu w sieci w ciągu najbliższych 24 lub 36 godzin. Obliczenia te są oparte na prognozach odbiorów i dostaw, a także informacji o planowanych zmianach konfiguracji pracy systemu. Narzędzia symulacyjne pozwalają dokonywać analiz pracy systemu z pewnym wyprzedzeniem. Wraz z możliwością ilościowego sterowania poszczególnymi źródłami, możliwe jest takie sterowanie systemem, aby zarówno system jak i poszczególne realizowane umowy były zrównoważone energetycznie i stabilne pod względem ciśnień, mimo ewentualnej zmienności pracy źródeł lub rozpyłów strumieni, wynikających ze zróżnicowanych poziomów odbioru. Ma to szczególne znaczenie w przypadku coraz częściej spotykanych rozwiązań, gdy jeden obszar bilansowy obejmuje źródła i systemy o znacznie zróżnicowanej kaloryczności gazu. Wyniki obliczeń symulacyj-

nych pozwalają również określać bieżący i przewidywany stan zbilansowania poszczególnych umów i klientów. Posiadanie takiej informacji pozwala przekazywać ją uczestnikom rynku, co stanowi wypełnienie obowiązku nałożonego na operatorów przez przepisy prawa [12].

Obliczenia symulacyjne uwzględniające zmienność jakości paliwa gazowego stosowane do celów analitycznych (*off-line*) mają szczególne znaczenie, gdy produktem oferowanym przez operatorów jest przepustowość, również wyrażana w jednostkach energii na jednostkę czasu. Przeprowadzane analizy uwzględniające rozpyły kaloryczności dla różnych konfiguracji układów ruchu i struktur odbiorów pozwalają w sposób efektywny wykorzystywać posiadane instalacje przy analizach porównujących zapotrzebowanie i możliwości techniczne instalacji w zakresie przesyłanych ilości paliwa gazowego.

Do symulacji, zarówno przepływów energii jak również rozkładu energii zakumulowanej w systemie przesyłowym, wykorzystuje się obliczenia symulacyjne.

Zależność strumienia energii i objętości określa równanie:

$$Q_E = Q_V \cdot C_{Vmix} \quad (15)$$

gdzie:

Q_E – strumień energii [MJ/s],

Q_V – strumień objętości w warunkach normalnych [m^3/s],

C_{Vmix} – ciepło spalania mieszaniny odniesione do jednostki objętości w warunkach normalnych [MJ/m^3].

Zależność pomiędzy strumieniem energii i masy jest określona następująco:

$$Q_E = \frac{M}{\rho} \cdot C_{Vmix} \quad (16)$$

gdzie:

M – strumień masy [kg/s],

ρ – gęstość gazu [kg/m^3].

Po uwzględnieniu powyższych zależności model matematyczny nieustalonego przepływu gazu w rurociągu poziomym składa się z niżej przedstawionych równań: zachowania masy (17), zachowania pędu (18), stanu (19) oraz zachowania energii (20):

$$\frac{\partial Q_E}{\partial x} \cdot \frac{\rho}{C_{Vmix}} + S \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

gdzie:

S – pole powierzchni przekroju gazociągu [m^2],

x – współrzędna przestrzenna [m],

t – czas [s],

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -g\rho \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\lambda}{2d, S^2} \frac{|Q_E| \cdot Q_E}{\rho} \frac{\rho}{C_{Vmix}} - \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (18)$$

gdzie:

p – ciśnienie [MPa],

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],

h – położenie danego przekroju w stosunku do poziomu morza [m],

d_i – średnica wewnętrzna gazociągu [m],

v – prędkość przepływu gazu [m/s],

λ – współczynnik oporów przepływu określany wg następującej zależności:

$$\frac{1}{\lambda} = -2,00 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{e/d_i}{3,71} \right) \quad (19)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa,

e – średnia wysokość nierówności (chropowatości) ścianki [m].

$$\rho = \frac{p}{ZRT} \quad (20)$$

gdzie:

Z – współczynnik ściśliwości,

R – indywidualna stała gazowa, $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$

T – temperatura gazu [K].

Temperaturę gazu wzdłuż gazociągu określa się z zależności:

$$T(x) = T_o + \frac{T(0) - T_o}{C_c x} (1 - e^{-C_c x}) \quad (21)$$

gdzie:

T(x) – temperatura gazu w przekroju x [K],

T(0) – temperatura gazu na początku danego odcinka gazociągu [K],

T_o – temperatura otoczenia gazociągu [K],

C_c – współczynnik przenikalności cieplnej gazociągu.

Energia zgromadzona w i-tym odcinku gazociągu określana jest z równania:

$$V_{,i}(t) = \frac{d_i^2 \pi l}{4} \frac{T_n}{p_n K l} \int_0^l \frac{p(x,t) \cdot C_{v,mix}(x,t)}{T(x,t)} dx \quad (22)$$

gdzie

d_i – średnica wewnętrzna danego odcinka liniowego gazociągu [m],

l – długość danego odcinka gazociągu [m],

p(x,t) – ciśnienie [MPa],

T(x,t) – temperatura [K],

C_{v,mix}(x,t) – ciepło spalania mieszaniny [MJ/m³].

W przypadku symulacji statycznej odwzorowywany jest układ pracy systemu w stanie ustalonym. W praktyce opiera się on na bilansie ilości gazu wpływającego i wypływającego z systemu z uwzględnieniem rozkładu ciśnienia. Jednak taki sposób symulacji całkowicie pomija wpływ akumulacji, jej zmian w czasie oraz zmienności w czasie składu medium. Symulacja dynamiczna odtwarza warunki pracy systemu, z dokładnością kroku czasowego obliczeń z uwzględnieniem akumulacji, jej zmian a także składu gazu w poszczególnych fragmentach systemu w funkcji czasu. Przy zastosowaniu symulacji do określania wartości ciepła spalania w poszczególnych punktach wyjścia, z uwzględnieniem zmienności w czasie, wykorzystanie modelu uwzględniającego dynamikę zmian jest niezbędne.

Model dynamiczny jest opracowany przy założeniu całkowitego mieszania się strumieni w węzłach oraz zastosowaniu metody interpolacji składu gazu wzdłuż gazociągu pomiędzy węzłami w danej chwili czasu. Taka metoda pozwoliła z odpowiednią dokładnością określić parametry mieszaniny w danym miejscu i czasie.

W stosowanym systemie do symulacji sieci, własności fizyczne gazu obliczane są na podstawie własności poszczególnych składników zadeklarowanych mieszanin gazu. Na ich podstawie wyliczane są wartości wielkości objętościowych, gęstości względnej, lepkości oraz ciepła spalania. Składy gazu mogą być podawane w udziałach, zarówno objętościowych jak i molo-

wych. Jakkolwiek wyniki i parametry stanu systemu podawane mogą być w wielkościach objętościowych lub z nimi związanych, wszystkie obliczenia oparte są na ilościach masowych i molo- wych. Przeliczanie z masy na objętość i energię realizowane jest zgodnie z [4].

Ze względu na to, że podstawowym elementem wykorzystywanym do obliczeń energii w punktach wyjścia jest ciepło spalania, dalsze omówienie systemu symulacyjnego zostanie przede wszystkim dokonane pod kątem wyznaczania wartości ciepła spalania w punktach sieci.

Wykorzystywany symulator dynamiczny odwzorowanie rozkładu parametrów fizyko-chemicznych w sieci określa w oparciu o określenie składu gazu w funkcji (x,t). Mając wyznaczony dla danego miejsca w sieci i określonego czasu dokładny skład mieszaniny wyliczane są wszystkie pozostałe parametry jakościowe ją charakteryzujące. Zachowanie się mieszaniny i jej poszczególnych składników w odcinkach gazociągów zostało zapisane za pomocą równania zachowania masy w postaci:

$$\frac{\partial M c_i}{\partial x} + S \frac{\partial \rho c_i}{\partial t} = 0 \text{ dla } i = 1..N \quad (23)$$

gdzie:

c₁ .. c_N – udziały masowe poszczególnych składników gazu ziemnego.

Ze względu na stopień skomplikowania rozwiązania układu równań (17),(18),(19), (20) i (21) dla pełnego składu gazu ziemnego w obliczeniach symulacyjnych przyjęto następujące założenia upraszczające:

- informacja o parametrach jakościowych ma charakter dyskretny z dokładnością do częstotliwości próbkowania,
- krok czasowy próbkowania jakości odpowiada krokowi czasowemu kolejnych obliczeń a także dyskretyzacji wszystkich innych parametrów.

Wartość poszczególnych parametrów jakościowych pojedynczej próbki gazu jest powiązana z minimalną objętością gazu znajdującą się w danym czasie i miejscu w systemie. Dla danej chwili taka próbka wraz z kompletem parametrów jakościowych jest określona przez swoje położenie w systemie. System do śledzenia jakości pozwala na monitorowanie położenia takiej cząstki od jej wprowadzenia do modelowanego systemu aż do jej wyjścia. Mieszanie się strumieni cząsteczek modelowane jest w węzłach sieci, w których strumienie te się spotykają.

Dla symulacji dynamicznych model śledzenia jakości gazu w poszczególnych miejscach sieci realizowany jest w oparciu o obliczenia dokonywane w kolejnych krokach. W pierwszej kolejności obliczane są zmienne stanu. Następnie uzyskane informacje o prędkościach cząsteczek wykorzystywane są do obliczenia nowego położenia cząstek, do których przypisane są parametry jakościowe. Na tej podstawie obliczane są nowe wartości składu i wynikających z niego parametrów fizyko-chemicznych w punktach styku odcinków. (węzłach sieci), w których następuje mieszanie strumieni.

Mieszanie poszczególnych składników mieszaniny opisane jest następującym wzorem:

$$x_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^k \frac{m_j}{M_j}} \sum_{j=1}^k \left[\frac{m_j}{M_j} x_{ij} \right] \quad (24)$$

gdzie:

m_j – strumień masowy w danym kroku symulacji [kg/s],

M – masa molowa danego składnika gazu [kg/mol],

$x_1 \dots x_n$ – udziały molowe poszczególnych składników gazu (mieszanki),

j – indeks strumienia wpływającego do węzła w danym kroku symulacji.

Dla poszczególnych gazów, będących składnikami gazu ziemnego, zostały przyjęte wartości parametrów jakościowych zgodnie z [4].

Walidacja symulatora polega na porównaniu wartości ciśnień i składu gazu w wybranych punktach sieci z wartościami zmierzonymi w reprezentatywnych punktach sieci przesyłowej.

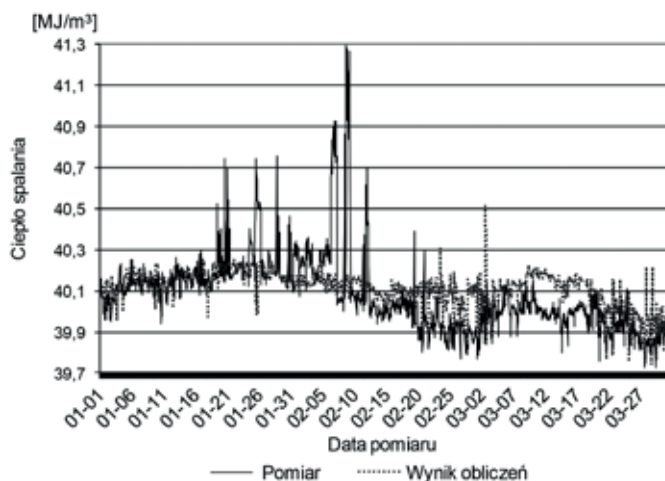
Wykorzystanie obliczeń symulacyjnych do określania ciepła spalania w poszczególnych punktach wyjścia z systemu przesyłowego pozwala na uniknięcie znaczących wydatków inwestycyjnych. Określenia wymaga jednak koszt metrologiczny zastosowania takiej metody – o ile większa będzie niepewność wyznaczenia ciepła spalania tą metodą w porównaniu do niepewności wynikającej z pomiaru chromatograficznego. Do obliczeń wykorzystywana jest symulacja dynamiczna, czyli symulacja procesu przepływów z uwzględnieniem ciągłości zmian w czasie, wyniki obejmują nie tylko przepływy i ciśnienia, ale również ciepło spalania jako jeden z parametrów jakościowych.

Podstawowymi elementami mającymi wpływ na określenie niepewności, tak wyznaczonej wartości ciepła spalania, mają niepewności jakimi obciążone są wartości wszystkich danych wejściowych, a zwłaszcza strumieni i jakości gazu zasilającego analizowany układ, a także niepewności jakie wynikają z jakości odwzorowania układu rzeczywistego, przez zastosowany model. W zakresie danych pomiarowych wejściowych ich niepewności oraz metody ich określenia zostały opisane w [1,6,7,9,10]. Do szczegółowego omówienia pozostaje analiza niepewności jaką wprowadza zastosowanie modelu symulacyjnego. W tym przypadku mamy do czynienia z wiernością odtworzenia układu rzeczywistego. Zatem czynnikami, mającymi główne znaczenie, są zgodność uzyskiwanych wyników z pomiarami referencyjnymi oraz powtarzalność wyników,, świadcząca o stabilności metody numerycznej.

Podstawowym kryterium jest zgodność odtworzenia układu rzeczywistego, którego spełnienie pozwala dopuścić dany model do operacyjnych i rozliczeniowych obliczeń rekonstrukcyjnych. Przy ocenie poprawności działania takiego rozwiązania i określeniu niepewności, proponuje się metodę analogiczną do tradycyjnego wzorcowania urządzeń pomiarowych. W tym przypadku, jako wzorzec przyjęte są wyniki z urządzeń pomiarowych, usytuowanych w odpowiednich miejscach systemu przesyłowego. Wskazaniami urzędnika sprawdzanego są wartości otrzymywane z obliczeń symulacyjnych. Ze względu na przedmiot badania porównywane są zmierzone oraz wyliczone wartości ciepła spalania. Zgodnie z [8] wartości ciepła spalania wykorzystywane do określania wartości energii w systemach gazowych powinny być wyznaczone z niepewnością względną, w zależności od klasy pomiaru: dla klasy A $\pm 0,6$, dla klasy B 1,25% oraz dla klasy C 2,0%. Brak jest konkretnych danych o tym jakie pomiary należą do klasy A, B lub C. W praktyce jest to określane przez poszczególnych operatorów często w porozumieniu z krajowymi organami

nadzoru metrologicznego. W polskim systemie gazowym, zgodnie z [5] wartość ciepła spalania przypisana do strefy (grupy punktów wyjścia) nie powinna różnić się o więcej niż $\pm 3\%$ od wartości zmierzonej w dowolnym punkcie danej strefy.

Zgodnie z powyższym dokonane zostało porównanie wyników obliczeń dla fragmentu systemu przesyłowego i odpowiadających im w czasie i lokalizacji wartościom pomiarów. Przykładowy przebieg wartości zmierzonych i wyliczonych został przedstawiony na rys. 3. Różnice mieściły się w zakresie od $-2,68\%$ do $1,68\%$. Zatem spełniły opisane wyżej kryteria. Należy nadmienić, że w przypadku prowadzenia symulacji „on-line” takie porównanie jest prowadzone na bieżąco ze względu na kontrolę poprawności danych wejściowych.



Rys. 3. Przykładowe porównanie wartości pomiaru i wyników obliczeń symulacyjnych wartości ciepła spalania

Fig.3 Example of comparison between measured and calculated values of calorific value

Określenie dokładności rozliczenia i niezbilansowania umowy, a także systemu,, pozwala na określenie technicznie uzasadnionych granic tolerancji niezbilansowania. Granice te określają przy jakim niezbilansowaniu, wynikającym z porównania realizacji wejść i wyjść w systemie, może ono wynikać z własności metrologicznych zastosowanych technik pomiarowych i algorytmów obliczeniowych. Dokładność wyznaczenia niezbilansowania umów lub też bilansu fizycznego systemu, bezpośrednio wynika z niepewności określenia poszczególnych wartości, wchodzących w skład bilansu określanego odpowiednio według zależności (2) lub (3). W porównaniu do niepewności „określenia niezbilansowania umów lub systemu w jednostkach objętości „zasadnicze znaczenie dla niepewności określenia bilansu ma niepewność wyznaczenia wartości ciepła spalania dla poszczególnych punktów wejścia i wyjścia. W przypadku stosowania obszarów z pomiarem referencyjnym należy przyjąć, że ciepło spalania jest określane z dokładnością zbliżoną do maksymalnej dopuszczalnej różnicy, pomiędzy wartością referencyjną a pojedynczym pomiarem. W przypadku zastosowania obliczeń symulacyjnych, do obliczeń niepewności bilansu, można przyjąć uzyskanie niepewności stwierdzone w czasie weryfikacji obliczeń. Pewnym uproszczeniem może być przyjęcie dopuszczalnej różnicy pomiędzy wynikami obliczeń i odpowiednio umiejscowionych pomiarów weryfikują-

cych poprawność obliczeń. Na niepewność bilansu również ma znaczący wpływ ilość punktów wejścia i wyjścia oraz struktura wielkości realizowanych w nich dostaw i odbiorów. Zatem określenie technicznie uzasadnionych wartości tolerancji niezbilansowania musi być obliczane dla każdego z systemów indywidualnie, biorąc pod uwagę powyżej opisane czynniki.

Wprowadzenie określania zapotrzebowania odbiorców i prognoz dostaw, a następnie rozliczenia bilansu w jednostkach energii, wymaga od operatora uwzględnienia kaloryczności gazu, zarówno przy programowaniu rozplywów jak i określaniu ilości realizacji usługi przesyłania. Stosując tradycyjne metody pomiarowe wymagałoby to instalowania znacznej ilości chromatografów procesowych. Ze względu na wysoką cenę tych urządzeń, byłoby to bardzo kosztowne dla operatorów i w efekcie końcowym spowodowałoby zwiększenie opłat za transport gazu. Jednakże współczesne systemy do zarządzania pracą systemów przesyłowych, zawierające zarówno dane telemetryczne jak i systemy symulacyjne, pozwalają na realizację tych zadań w sposób optymalny z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego. Zastosowanie obliczeń symulacji dynamicznej, z powodzeniem może zastąpić rozbudowaną sieć pomiarów składu gazu. Odpowiednio wyregulowany i walidowany model sieci pozwala, nie tylko zrezygnować z instalacji kilku setek chromatografów procesowych, ale umożliwia również w znacznie dokładniejszy sposób określić ilość energii zgromadzonej w sieci przesyłowej. To natomiast, powoduje zwiększenie dokładności bilansu systemu przesyłowego.

7. Wnioski

Zapewnienie zbilansowania energetycznego sieci gazowej, przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości dostaw, czyli odpowiedniego ciśnienia w sieci, wymaga sterowania źródłami, uwzględniając ich wpływ na kaloryczność gazu w całej strukturze sieci a także na rozkład ciśnienia. Chcąc spełnić te wymagania, sterowanie źródłami musi uwzględniać zarówno kaloryczność poszczególnych źródeł, wartości ciśnienia dostawy, ale też wzajemną lokalizację punktów wejścia i wyjścia, wraz z realizowanymi w nich wartościami odbiorów z sieci. Biorąc pod uwagę, że gazowe sieci przesyłowe są z natury sieciami o złożonej strukturze topologicznej, już samo rzetelne określenie ilości energii zakumulowanej w sieci wymaga wykorzystania obliczeń symulacyjnych. Kolejnym zagadnieniem jest przygotowanie odpowiedniego programu ruchu sieci tak, aby powyższe kryteria były spełnione. Narzędzia symulacyjne umożliwiają dokonanie analiz wielu wariantów pracy systemu, w zależności od prognozowanych zapotrzebowań odbiorów oraz deklarowanych przez klientów dostaw. W takich przypadkach obliczenia symulacyjne, na podstawie danych prognostycznych (prognozy zapotrzebowania obszarów komunalnych, nominacje dla odbiorców przemysłowych i nominacje dla kopalń i wejść importowych), pozwalają określić przewidywane wartości ciśnienia i bilans energetyczny dla najbliższych dwudziestu czterech godzin. Wyniki takich obliczeń umożliwiają określenie stanu podstawowego przewidywanego bilansu systemu i rozkładu ciśnienia w sieci. W sytuacji, gdy odbiega on od oczekiwań, obliczenia optymalizacyjne powinny umożliwić określenie optymalnego strumienia zasilania sieci z poszczególnych wejść. Dane te pozwalają na najbardziej efektywne wykorzystanie środków, jakimi dysponuje operator. Mogą to

być odpowiednie ilości przekazywane z instalacji magazynowych, zwiększenia strumieni na połączeniach międzysystemowych, w których funkcjonuje konto operatorskie, lub też oferty odpowiednich usług systemowych z rynku bilansującego. W przypadku korzystania z usług systemowych na rynku bilansującym, wyniki obliczeń symulacyjnych stanowią obiektywne uzasadnienie wykorzystywania tzw produktów lokalizowanych, czyli ofert dostawy paliwa gazowego w konkretnych fizycznych punktach wejścia. Jest to szczególnie istotne, gdy oferty takie mają ceny wyższe od ofert złożonych w punkcie wirtualnym.

Mając na uwadze obecne uwarunkowania techniczne i kontraktowe operatorów gazowych sieci przesyłowych wyniki obliczeń symulacyjnych mają istotne znaczenie, nie tylko dla działań o charakterze technicznym, ale również w zakresie umownym i finansowym.

LITERATURA

- [1] Brzęczkowski S.1997. Wpływ niepewności niektórych danych wejściowych na niepewność pomiaru strumienia objętości gazu za pomocą kryzy pomiarowej. Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych, Krynica.
- [2] Gas Balancing Launch Documentation BAL0125-11; ENTSSOG; www.entsog.eu.
- [3] Haas P.2012. Biogas: Chapter 13 Gas Quality Parameter Computation in Intermeshed Networks. InTech, marzec.
- [4] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej, Operator Gazociągów Przesyłowych. GAZ-SYSTEM S.A; wrzesień 2011.
- [5] ISO 5168:1978 : Measurement of fluid flow – Evaluation of uncertainties.; ISO, 1991.
- [6] International Recommendation OIML R 140; Measuring systems for gaseous fuel; Edition 2007(E).
- [7] PN-EN ISO 5167-2 Pomiary strumienia płynu za pomocą zwęzek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym Część 2: Kryzy; Polski Komitet Normalizacyjny; lipiec 2005.
- [8] PN-EN 12261:2005/A1:2008 Gazomierze. Gazomierze turbinowe; Polski Komitet Normalizacyjny; grudzień 2008.
- [9] Polska Norma PN-EN ISO 6976:2008; Gaz ziemny – Obliczanie wartości kalorycznych, gęstości względnej i liczby Wobbego na podstawie składu.; Polski Komitet Normalizacyjny; styczeń 2008.
- [10] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego. Dz. Ustaw z 2010 roku nr 133 poz. 891.
- [11] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) Nr 715/2009 z dnia 13 lipca 2009 r. w sprawie warunków dostępu do sieci przesyłowych gazu ziemnego i uchylające rozporządzenie (WE) nr 1775/2005. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L211/36 z 14.08.2009.
- [12] ZN-G-4002:2001: Zasady rozliczeń i technika pomiarowa; Norma Zakładowa PGNiG