konferencja
RYNEK GAZU

Andrzej J. Osiadacz, Maciej Chaczykowski, Łukasz Kotyński
Politechnika Warszawska

OPROGRAMOWANIE DO BADANIA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH SIECI GAZOWYCH

Słowa kluczowe: sieci gazowe, prowadzenie ruchu sieci, symulator sieci gazowej, symulacja dynamiczna

Streszczenie. Wyznaczenie operatorów systemów przesyłowych, operatorów systemów dystrybucyjnych lub operatorów systemów połączonych oraz stosowanie zasady TPA powodują, że znacznie wzrasta rola procesów modelowania przepływu gazu w sieciach. Operatorzy odpowiedzialni za realizację usługi przesyłowej powinni mieć pełną wiedzę o właściwościach hydraulicznych sieci którą użytkują. Głównym celem stosowania programów symulacyjnych jest badanie zachowania się sieci gazowych w określonych warunkach. Rozwiązanie określonego układu równań algebraicznych lub różniczkowych opisujących sieć, dla założonych obciążeń i zasileń sieci da odpowiedź na pytania dotyczące wartości ciśnień lub przepływów w wybranych punktach lub fragmentach sieci. Dzięki algorytmom symulacji możemy znacznie zmniejszyć nakłady na wyposażenie pomiarowe systemów gazowniczych, a także, zakładając poprawność modeli, uzyskiwać pełną i dokładną informację o systemie. W sieciach o ciśnieniu do 0,5 MPa stosujemy wyłącznie algorytmy symulacji statycznej. Z kolei w sieciach przesyłowych stosowane są przede wszystkim algorytmy symulacji dynamicznej. W artykule został przedstawiony pakiet do symulacji sieci w stanach nieustalonych. Weryfikacja na zbiorze danych rzeczywistych potwierdziła poprawność działania algorytmu.

1. WSTĘP

Wyznaczenie operatorów systemów przesyłowych, operatorów systemów dystrybucyjnych oraz stosowanie zasady TPA powoduje, że znacznie wzrasta rola procesów modelowania przepływu gazu w sieciach. Operatorzy odpowiedzialni za realizację usługi transportowej powinni mieć pełną wiedzę o własnościach hydraulicznych sieci którą użytkują. Zarówno prawidłowa eksploatacja istniejących systemów gazowniczych jak również ich rozbudowa nie może być realizowana bez pomocy programów obliczeniowych. Prawidłowa eksploatacja sieci to przede wszystkim realizacja dostaw gazu odbiorcom zgodnie z podpisanymi umowami, przy jednoczesnej minimalizacji szeroko rozumianych kosztów eksploatacji. Z kolei, prawidłowa rozbudowa sieci to wybór wariantu który spełni warunki przyjętego kryterium kosztów eksploatacji oraz budowy.

Oprogramowanie wykorzystujące modele matematyczne elementów sieci powinno zatem stanowić podstawowe narzędzie pracy służb odpowiedzialnych za

Model matematyczny jest układem równań który w określony sposób i z określoną dokładnością reprezentuje rzeczywisty system. Model matematyczny jest oczywiście uproszczeniem systemu rzeczywistego ponieważ zawiera tylko te aspekty systemu, które odpowiadają wymaganiom stawianym modelowi.

Modele można klasyfikować zgodnie z założeniami przyjętymi przy ich tworzeniu. Jeżeli system ma zmienne które zmieniają się w sposób ciągły w czasie to należy używać modeli dynamicznych opisywanych równaniami ogólnie różniczkowymi. Jeżeli zmienne nie są funkcją czasu, wtedy należy stosować model statyczny opisywany równaniami algebraicznymi. Wybór modelu zależy od konkretnej sytuacji. Na przykład, w sieci gazowej niskociśnieniowej, zmiany ciśnienia i przepływu są bardzo szybkie. Są one pomijane w większości rozpatrywanych przypadków, stąd stosowanie modeli stanu ustalonego - równań algebraicznych. W przypadku sieci wysokiego ciśnienia dynamika przepływającego gazu jest znacznie wolniejsza ze względu na ogromne ilości gazu zmagazynowane w rurociągach. Pominięcie jej prowadziłoby do dużych błędów w opisie zjawiska. Stąd konieczność stosowania modeli matematycznych w postaci równań różniczkowych.

Głównym celem stosowania programów symulacyjnych jest badanie zachowania się sieci gazowych w określonych warunkach. Rozwiązanie określonego układu równań algebraicznych lub różniczkowych opisujących sieć, dla założonych obciążeń i zasilań sieci da nam odpowiedź na pytania dotyczące wartości ciśnienia lub przepływu w wybranych punktach lub fragmentach sieci [1]. Dzięki algorytmom symulacji możemy znacznie zmniejszyć nakłady na wyposażenie pomiarowe systemów gazowniczych, a także, zakładając poprawność modeli, uzyskiwać pełną i dokładną informację o systemie.

2. SYMULACJA DYNAMICZNA SIECI

Model matematyczny nieustalonego przepływu gazu w rurociągu formułowany jest w oparciu o następujące prawa fizyki:

- równanie zachowania masy (zmiana masy w objętości kontrolnej spowodowana być może tylko różnicą wpływu i wypływu)

$$\frac{\partial(\rho \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

gdzie: A - pole przekroju poprzecznego rurociągu, M - przepływ masowy, ρ - gęstość gazu, x - współrzędna przestrzenna, t - czas

- równanie zachowania momentu (siła działająca na element o określonej masie w określonej chwili jest równa zmianom pędu tego elementu w tej chwili)

$$\rho \cdot g \cdot \sin\alpha + \frac{\partial p}{\partial} + \frac{\partial}{\partial}(\rho \cdot w) + \frac{\partial}{\partial}(\rho \cdot w^2) + \frac{2 \cdot \rho \cdot f \cdot w^2}{} = 0 \tag{2}$$

gdzie: g - przyspieszenie ziemskie, α - kąt nachylenia gazociągu w stosunku do poziomu, w - średnia prędkość gazu w przekroju rurociągu, D - średnica rurociągu, f - współczynnik oporu hydraulicznego Fanninga

– równanie energii

$$\Omega - W = \Delta E \tag{3}$$

gdzie: Ω - ciepło dodane do systemu, W - praca wykonana przez system, ΔE - zmiana energii w systemie.

Należy rozróżnić dwa przypadki przepływu gazu [4]:

– adiabatyczny $d\Omega / dt = 0$,

– izotermiczny $d\Omega / dt \neq 0$.

Adiabatyczny przepływ występuje w przypadku bardzo szybkich zmian przepływu gazu; efekt wymiany ciepła może być pominięty. Z kolei, izotermiczny przepływ odpowiada wolnym zmianom przepływu gazu; zmiana temperatury gazu na skutek wymiany ciepła pomiędzy gazem i ziemią może być pominięta.

– równanie stanu

Przyjmując że T = const. czyli:

$$p = \rho \cdot c^2 \tag{4}$$

gdzie: c - prędkość dźwięku w gazie

do symulacji nieustalonego przepływu gazu używamy równań (1), (2) oraz (4).

Otrzymany w oparciu o powyższe równania model, typu hiperbolicznego uwzględnia zarówno zjawisko bezwładności przepływającego gazu, jak również ciśnienie dynamiczne. Czasami, w określonych warunkach, udział ilościowy tych członów w opisie zjawiska jest pomijalny dla stosunkowo wolnych obciążeń czy też gazociągów o dużych pojemnościach, i wtedy stosujemy modele uproszczone typu parabolicznego, które są znacznie prostsze do numerycznego rozwiązania w porównaniu z równaniem hiperbolicznym.

Algorytm symulacji dynamicznej oblicza wartości ciśnienia lub przepływu w wybranych punktach (węzłach) sieci w określonych chwilach czasowych. W porównaniu z algorytmem stanów ustalonych, liczba danych wejściowych niezbędnych do wykonania obliczeń jest znacznie większa ponieważ zarówno obciążenia jak również zasilania systemu mogą być funkcją czasu. Rośnie w sposób znaczący w porównaniu do symulacji statycznej czas obliczeń, ponieważ:

– problem polega na rozwiązaniu układu równań różniczkowych cząstkowych lub zwyczajnych zamiast algebraicznych,

– symulacja dynamiczna dotyczy określonego przedziału czasu, a więc wielokrotnego rozwiązania układu równań.

3. ALGORYTM SYMULACJI DYNAMICZNEJ

Opracowany algorytm symulacji dynamicznej sieci gazowej bazuje na tzw. uogólnionym węźle, do których zalicza się punkty dyskretyzacji sieci, połączenia rur oraz końcówki rur, które są traktowane jako odbiorcy z rozbiorem równym zero. W oparciu o równanie zachowania masy w węźle wyprowadzono przybliżone równanie opisujące nieustalony przepływ czynnika [2]:

$$\frac{dm}{dt} = V\frac{d\rho}{dp}\frac{dp}{dt} \tag{5}$$

gdzie : m - masa gazu w węźle, V - objętość geometryczna węzła, ρ - gęstość gazu, p - ciśnienie gazu w węźle.

Dla procesu izotermicznego słuszne jest równanie :

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{1}{c^2}$$

gdzie : c - prędkość dźwięku w gazie.

Równanie (5) dla węzła j-tego, którego obciążenie wynosi M_j oraz który jest incydentny do k rur można zapisać w postaci :

$$\frac{V_j}{c^2}\frac{dp_j}{dt} = \sum_{i=1}^{k} B_i M_i - M_j \tag{6}$$

gdzie : M - przepływ masowy, $M=Q\rho$, kg/s, Q - przepływ objętościowy , m^3/s, $B_i = 1$ gdy gaz wpływa do węzła, $B_i = -1$ gdy gaz wypływa z węzła, k - liczba rur incydentnych do j-tego węzła.

Nieustalony przepływ gazu można opisać równaniem:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{c^2}{A\lambda}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{7}$$

gdzie : A - pole przekroju poprzecznego rury,

$\lambda = \lambda(p, M) = \dfrac{2fc^2|M|}{DA^2p}$ oporność właściwa przewodu,

f - współczynnik oporu hydraulicznego wg Fanninga,

D - średnica rury.

Przepływ masowy można wyznaczyć z równania :

$$M = -\frac{1}{\lambda}\frac{\partial p}{\partial x}$$

co po scałkowaniu w przedziale x = 0 i x = Δx daje :

$$M = \frac{p_1 - p_2}{\lambda \cdot \Delta x} \tag{8}$$

gdzie : p_1 - ciśnienie w punkcie x = 0 , p_2 - ciśnienie w punkcie x = Δx .

Dla każdego węzła j można określić zbiór C_j węzłów incydentnych do j. Więc jeśli $i \in C_j$ to para węzłów (i , j) oznacza początek i koniec określonego odcinka dyskretyzacji rury. Jeśli para węzłów (i , j) odpowiada rurze l, to:

$$S_{ij} = S_{ji} = \frac{1}{\lambda_l \Delta x_l} \tag{9}$$

Wykorzystując równanie (9) w równaniu (6) otrzymujemy :

$$\frac{V_j}{c^2}\frac{dp_j}{dt} = \sum_{i=1}^{k}(p_i - p_j)\cdot S_{ij} - M_j \tag{10}$$

co po scałkowaniu w granicach t , t + Δt daje :

$$\frac{V_j}{c^2}\left(p_j^{n+1} - p_j^n\right) = \sum_{i=1}^{k} S_{ij} \int_t^{t+\Delta t}(p_i - p_j)dt - \int_t^{t+\Delta t} M_j dt \tag{11}$$

Przy wykorzystaniu do scałkowania członu :

$$a_l = \sum_{i=1}^{k} S_{ij} \int_t^{t+\Delta t}(p_i - p_j)dt$$

metody trapezów otrzymujemy ostatecznie:

$$\frac{V_j}{c^2 \Delta t}\left(p_j^{n+1} - p_j^n\right) = \sum_{i=1}^{k} S_{ij}(p_i^{n+1} - p_j^{n+1}) - M_j' \tag{12}$$

gdzie : $M_j' = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t} M_j dt$ stanowi uśrednienie rozbioru gazu w węźle j .

Ostatecznie otrzymujemy układ równań liniowych, z których wyznacza się wartości ciśnienia w węzłach p^{n+1} w kolejnych krokach czasowych co w postaci macierzowej można zapisać następująco :

$$\underline{H}\underline{p}^{n+1} + \underline{K}\underline{f}^{n+1} = \underline{R}\underline{p}^{n} - \underline{M}'$$

gdzie:

dim $\mathbf{H}$ = n × n (n – liczba węzłów)

dim $\boldsymbol{K}$ = n × u (u – liczba elementów nierurowych)

dim R=n × n

dim $\mathbf{M}'$ = n × 1

dim $\mathbf{p}$=n × 1

dim $\mathbf{f}$ = u × 1

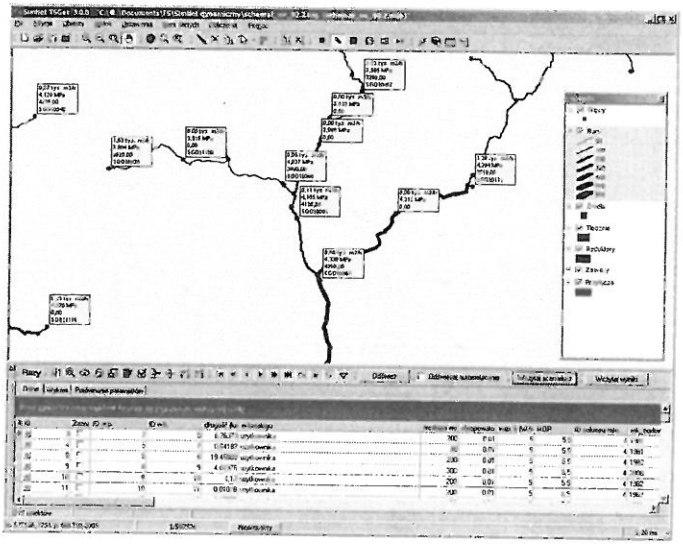
$\underline{K}$ - jest macierzą incydencji węzłów i elementów nierurowych,

$\underline{f}$ - wektor przepływów przez elementy nierurowe.

4. OPIS PAKIETU DO SYMULACJI DYNAMICZNEJ

Przedstawiony powyżej algorytm symulacji dynamicznej został zastosowany w pakiecie oprogramowania działającym w środowisku Windows [5], przeznaczonym do dynamicznej symulacji sieci gazowych podwyższonego średniego ciśnienia, wysokiego ciśnienia oraz sieci mieszanych, w których występują dwa poziomy wartości ciśnienia jednocześnie. W obliczanej sieci może występować dowolna liczba źródeł oraz dowolna liczba innych elementów nieliniowych. Elementy te mogą pracować z zadaną wartością jednego z następujących parametrów: ciśnienie wejściowe, ciśnienie wyjściowe, stopień sprężania (stopień redukcji) lub przepływ. Ponadto w sieci może znajdować się dowolna liczba zaworów odcinających, pracujacych w stanach: otwarty / zamknięty.

Program jest aplikacją obliczeniową GIS w tym sensie, że wykorzystuje sie w nim technologię GIS (Geographic Information System) do przechowywania i zobrazowania graficznych (geograficznych) i alfanumerycznych informacji o obiektach sieci gazowej, potrzebnych do obliczeń symulacyjnych sieci, oraz innych danych nie związanych z obliczeniami (rys. 1). Możliwość wygodnego dla użytkownika modyfikowania danych obiektu w środowisku graficznym jest wiec naturalna przy pracy z aplikacjami do obliczeń sieci gazowych.



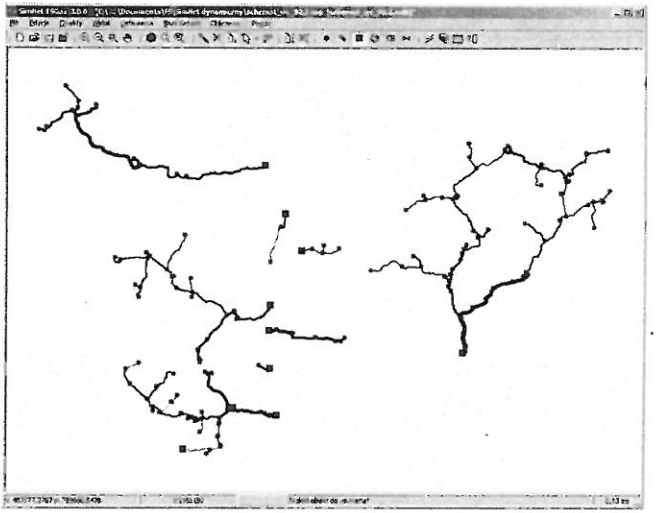
Rys. 1. Interfejs graficzny pakietu do symulacji dynamicznej *SimNet TSGas*

Poprawność działania algorytmu symulacji dynamicznej z wykorzystaniem pakietu SimNet TSGas weryfikowano na zbiorze danych rzeczywistych. W [3] przedstawiono wyniki obliczeń dwóch sieci wysokiego ciśnienia, w tym fragmentu sieci przesyłowej Wielkiej Brytanii, dla której dysponowaliśmy danymi pomiarowymi otrzymanymi z British Gas, natomiast w [6] przedstawiono wyniki obliczeń fragmentu polskiego systemu przesyłowego wysokiego ciśnienia. Badany fragment systemu brytyjskiego, składał się 58 odcinków, 5 tłoczni, 4 źródeł, oraz jednej stacji redukcyjnej, natomiast fragment krajowej sieci przesyłowej był zasilany z jednego źródła i składał się z 44 odcinków. Bardzo dobra zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów potwierdziła dokładność obliczeń programu.

4.1. Przykład wyników symulacji dynamicznej sieci przesyłowej

Badaniom symulacyjnym poddana została część polskiego systemu przesyłowego gazu ziemnego wysokometanowego. Schemat sieci przedstawiono na rysunku 2. Sieć składa się z 277 łuków o danej średnicy, długości oraz oporności hydraulicznej przewodów. Współpracuje ona z 9 węzłami systemowymi, które stanowią dla niej źródła dostaw gazu. Z całkowitej liczby 261 węzłów, 89 węzłów jest węzłami obciążonymi.

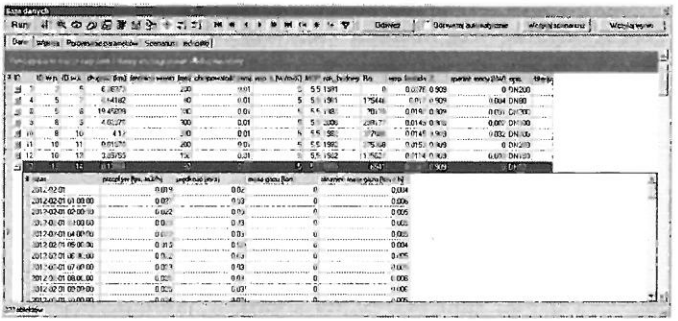
Dane dotyczące wymiarów geometrycznych przewodów oraz ich oporności hydraulicznej, wyrażonej wartością chropowatości wewnętrznej powierzchni rur uzyskano z systemu ewidencji sieci w standardzie GIS. Łączna długość gazociągów wynosi 1590 km, zakres średnic DN50-DN400, maksymalne ciśnienie robocze MOP obejmuje zakres 5-5,5 MPa. Wiek gazociągów wynosi 2-32 lat.



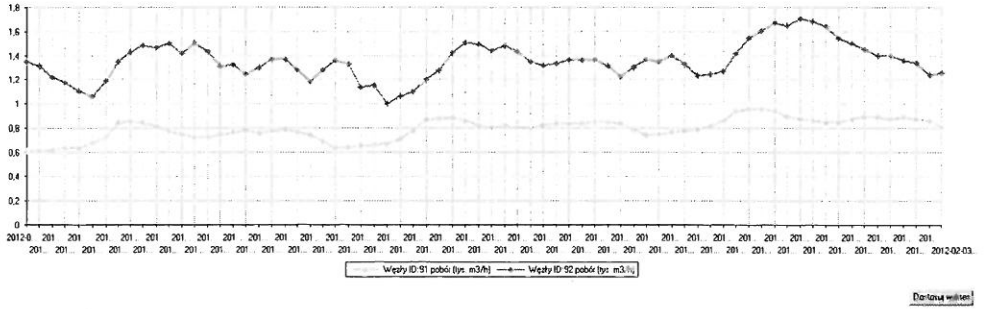
Rys. 2. Schemat sieci gazowej

W tabeli 1 podano przykład danych dotyczących przewodów sieci gazowej. Tabela składa się z dwóch poziomów. W górnej części tabelicy (nadrzędnej) znajdują się dane dotyczące wymiarów geometrycznych przewodów sieci. Po wskazaniu rekordu w tabeli możliwy jest dostęp do danych obejmujących parametry zmienne w czasie, takie jak przepływ, prędkość przepływu, itp.

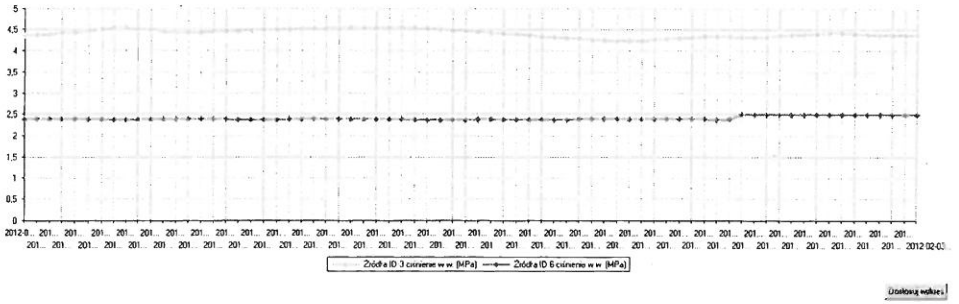
Tabela 1
Wymiary geometryczne odcinków sieci



Pobory gazu w wybranych węzłach sieci, pochodzące z systemu SCADA (symulator posiada funkcję importu danych z zewnętrznej bazy) przedstawiono na rysunku 3. Widoczne są przebiegi zmian poboru gazu w kolejnych godzinach doby. W przypadku odbiorców komunalnych przebieg zmian poboru ma charakter wolnozmienny, przy czym widoczny jest wzrost natężenia przepływu w godzinach dziennych oraz spadek natężenia przepływu w porze nocnej. Odbiorcy przemysłowi charakteryzują się większą nierównomiernością poboru gazu, wynikającą z przebiegu procesów technologicznych.

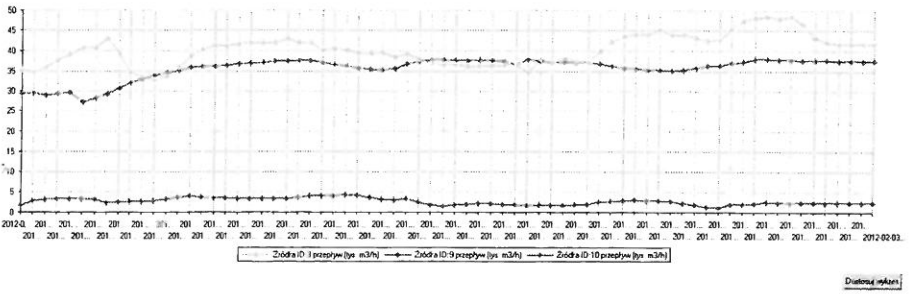


Rys. 3. Dane do symulacji – zmiany poboru gazu w ciągu doby



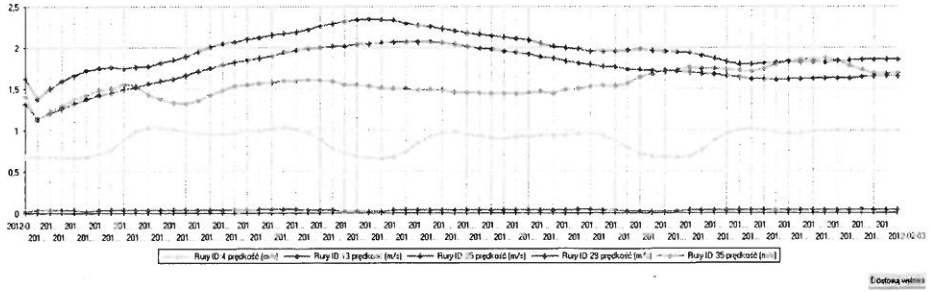
Rys. 4. Dane do symulacji – zmiany ciśnienia w źródłach w ciągu doby

Dane dotyczące parametrów pracy wybranych źródeł przedstawiono na rysunku 4. W przypadku źródeł wydajnościowych, rezultatem symulacji są przebiegi zmian wartości ciśnienia potrzebnego do realizacji dostaw gazu zgodnie z założoną wydajnością. Wszystkie źródła znajdujące się w analizowanej sieci są źródłami ciśnieniowymi, dla których algorytm symulacji dynamicznej wyznacza natężenie przepływu gazu (wydajności źródeł) (Rys. 5). Znajomość dobowego przebiegu zmian dostaw gazu do sieci w celu zapewnienia odpowiednich ilości gazu odbiorcom jest istotną informacją z punktu widzenia operatora sieci, pozwalającą na śledzenie przekroczeń mocy zamówionej.

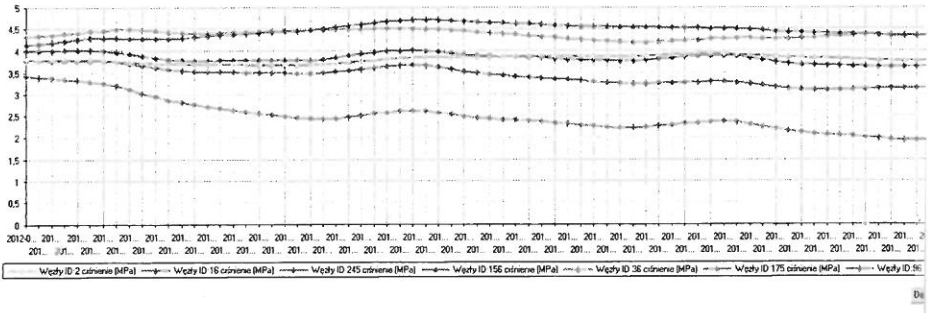


Rys. 5. Wyniki symulacji –zmiany wydajności wybranych źródeł gazu w sieci

Na rys. 6. przedstawiono wyniki obliczeń prędkości przepływu gazu w wybr nych odcinkach sieci. Widocznym jest, że sieć posiada duży zapas przepustow ści na przykład na łuku 13, ponieważ prędkość przepływu gazu w tym odcinl jest poniżej 0.1 m/s.



Rys. 6. Wyniki symulacji –zmiany prędkości przepływu gazu w czasie w wybranych odcinkach sieci



Rys. 7. Wyniki symulacji –zmiany ciśnienia gazu w czasie w wybranych węzłach siec

Wyniki obliczeń wartości ciśnienia w wybranych węzłach sieci przedstawio na rys. 7. Informacja o przekroczeniach minimalnego ciśnienia dostawy gazu odbiorców jest kluczowa dla prawidłowego prowadzenia ruchu sieci.

Czas symulacji w obliczeniach wynosił trzy doby. Warunek początkowy sym lacji dynamicznej tworzą przepływy i ciśnienia w sieci stanowiące wyniki sym lacji statycznej, przeprowadzonej dla danych odpowiadających zerowej (pocz kowej) chwili czasowej. Sieć potrzebuje zazwyczaj odpowiednio długiego cza symulacji aby „zapomnieć" wpływ warunku początkowego.

5. WNIOSKI

Doświadczenia uzyskane podczas stosowania pakietu [5] w zagadnieniach pra tycznych pozwalają na stwierdzenie, że można znacznie zmniejszyć nakłady wyposażenie pomiarowe systemów gazowniczych, a także, zakładając popra ność modeli, uzyskiwać pełną i dokładną informację o systemie. Stosowa ww. pakietu umożliwia realizację następujących funkcji:

- przeprowadzanie symulacji sieci w całości lub wybranych jej fragmentów w trybie off-line w celu analizy reakcji sieci na określone wymuszenia lub zmiany jej konfiguracji,
- ocenę jakości pracy systemu telemetrycznego i urządzeń pomiarowych,
- symulację w celu monitorowania pracy sieci,
- śledzenie zmian akumulacji gazu w systemie,
- wydawanie zapewnień dostawy gazu przyszłym odbiorcom,
- sprawdzenie jakości funkcjonowania sieci podczas prowadzenia remontu wybranej jej części,
- ocenę możliwości przepustowych sieci.

Jednocześnie, w najbliższym czasie pakiet zostanie wyposażony w dodatkowe procedury umożliwiające określanie masy gazu traconej w systemie na skutek nieszczelności, śledzenie procesu mieszania się gazów o różnych składach, oraz analizę zjawiska uderzenia hydraulicznego w sieci gazowej.

BIBLIOGRAFIA

[1] Osiadacz A.J.: Simulation and analysis of gas network, E & F. N. Spon, London 1987.
[2] Osiadacz A.J.: Numerical analysis of a method of transient simulation for gas networks, International Journal of Systems Science 21 (5), 1990, pp. 961-975
[3] Osiadacz A.J., Chaczykowski M.: Pakiet do symulacji dynamicznej sieci gazowych, Nowoczesne Gazownictwo 4 (3) 1999, 30-36
[4] Osiadacz, A.J., Chaczykowski, M.: Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models, Chemical Engineering Journal 81 (1-3), 2001, pp. 41-51
[5] SimNet TSGas, Pakiet do symulacji sieci gazowych w stanach nieustalonych, dokumentacja i instrukcja obsługi, Fluid Systems, Warszawa, 2011.
[6] Osiadacz, A.J., Chaczykowski, M., Kotyński Ł.: Badania właściwości dynamicznych sieci gazowej z wykorzystaniem pakietu SimNet TSGas 3, w materiałach XV Konferencji GAZTERM 2012, Międzyzdroje 2012.

Andrzej J. Osiadacz, Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Maciej Chaczykowski, Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Łukasz Kotyński, Zakład Systemów Ciepłowniczych i Gazowniczych, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa