

Mariusz Kamola

*Politechnika Warszawska, Transition Technologies*

Sebastian Plamowski

*Emerson Process Management Power & Water Solutions*

Czesław Godlejewski, Krzysztof Antoniewicz, Adam Gromnicki

*Gaz-System S.A. Oddział we Wrocławiu*

# Problem optymalnego tłoczenia gazu w sieci wysokiego ciśnienia

W artykule zaprezentowano problem optymalizacji kosztów pracy tłoczni pracujących w systemach przesyłu gazu ziemnego. Przedstawiono sposób sprowadzenia problemu do zapisu matematycznego w postaci zadania optymalizacji, które następnie może być rozwiązane przy pomocy algorytmów numerycznych. Na bazie problemu stworzone zostało dedykowane oprogramowanie zaprojektowane do rozwiązywania tego typu zadań. W artykule przeanalizowano główne elementy systemu, ze szczególnym uwzględnieniem użytych algorytmów obliczeniowych oraz autorskich modyfikacji, które wprowadzono w celu poprawy wydajności. Zaprojektowane rozwiązanie zostało wdrożone w południowo-zachodniej części polskiego systemu przesyłowego. Zebrane doświadczenia wraz z wynikami liczbowymi przedstawiono w artykule.

Słowa kluczowe: optymalizacja kosztów tłoczenia, symulacja sieci gazowej.

## Simulation-based optimization of gas transportation in a high-pressure gas network

The paper defines the problem of gas transmission cost minimization in a high-pressure natural gas pipeline system in south-western Poland. Dynamic optimization of compressor flows on a shifting horizon, for given demand predictions and dispatcher's schedules, is combined with simulation based goal function calculation. Difficulties of the simulation-optimization approach are discussed, and possible architecture solutions and algorithmic improvements by the authors are presented. The final control system architecture has a hierarchical structure: the optimal flows calculated by the optimization software correct classical PID outputs, which has been installed to provide short-term system efficiency. Balancing compressors runtime is considered as an additional control criterion. The system has been implemented and applied successfully, effectively reducing transmission costs.

Key words: operational cost optimization, gas network simulation.

## Wprowadzenie

Ewolucja polskiego systemu gazociągów wysokiego ciśnienia odzwierciedla dynamikę inwestycji przemysłowych, a w szczególności – rozwój energetyki bazującej na gazie ziemnym. Szybki rozwój tej ostatniej stwarza nowe wyzwania wobec stosowanych przez operatorów sieci przesyłowych strategii tłoczenia gazu. Umiejętne uwzględnienie prognoz i nominacji poborów i odbiorów, w połączeniu z rosnącymi

możliwościami magazynowania gazu w objętości geometrycznej gazociągów i – przede wszystkim – w nowo budowanych magazynach podziemnych, może przynieść znaczne oszczędności spółkom przesyłowym, przekładając się ostatecznie na ich zysk, jak i na ceny dla odbiorców końcowych.

Inżynierów sieci wspierają obecnie w procesie projektowania specjalizowane programy symulacyjne, natomiast

dyspozytorów – systemy SCADA (ang. *supervisory control and data acquisition*). W polskich spółkach gazowniczych rozpowszechnionym programem symulacyjnym jest SIMONE [7] – produkt współpracy SIMONE Research Group z Czech i niemieckiej firmy LIWACOM. Oprogramowanie to umożliwia modelowanie systemu, tj. przeprowadzenie symulacji jego działania, zarówno w warunkach ustalonych, jak i w kontekście dynamicznym, na podstawie konkretnych profili przepływu, ciśnień i temperatur uwzględnianych na horyzoncie kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu godzin. Dane początkowe symulacji mogą zostać wprowadzone ręcznie, mogą również być pobierane na bieżąco z zewnętrznych systemów rejestracji danych.

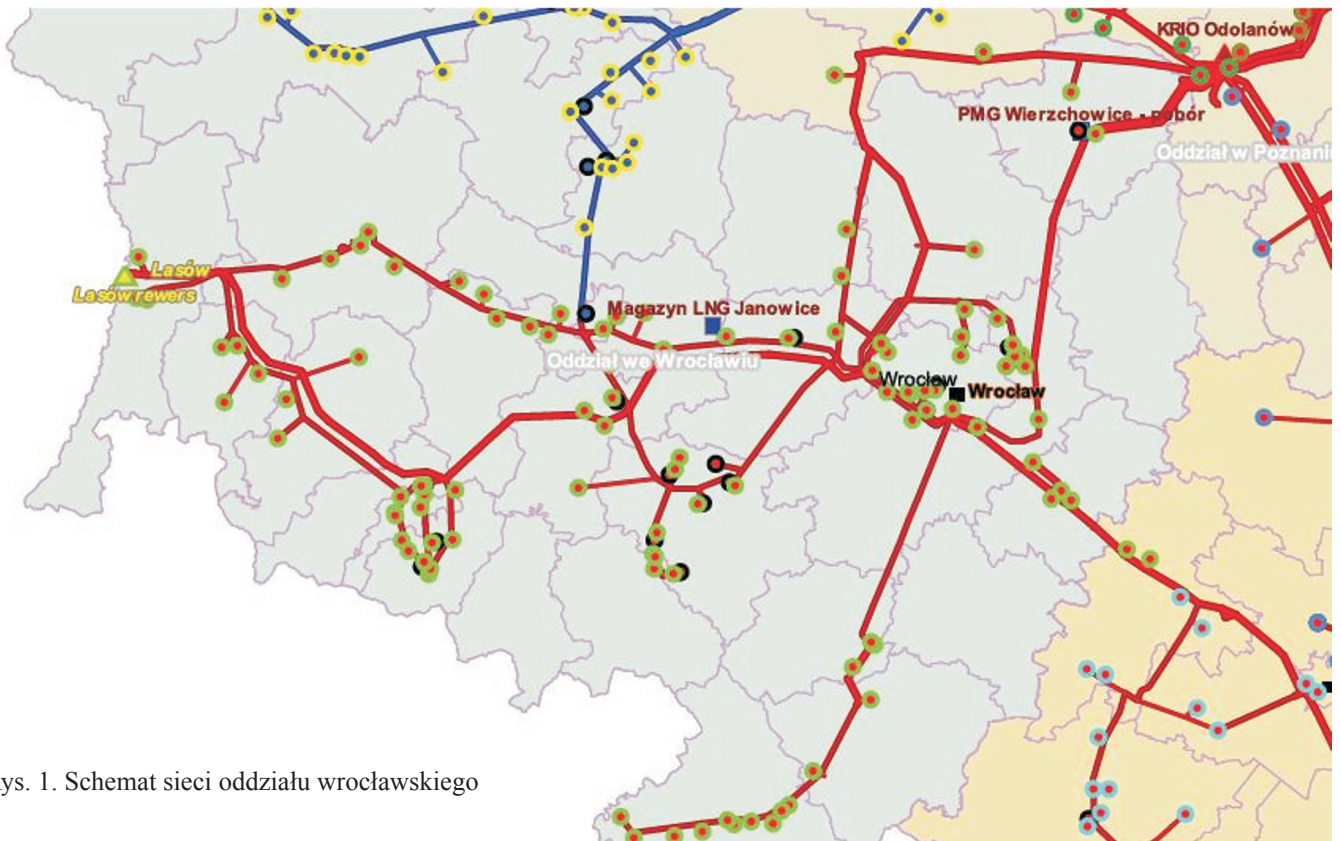
Oprogramowanie symulacyjne, jak SIMONE, umożliwia sprawdzenie, jaki wpływ na stan sieci będzie miała dana strategia tłoczenia gazu (tj. na przykład założone przepływy przez tłocznie czy wybrana droga przesyłu). Operator systemu może dzięki temu testować różne sposoby tłoczenia, aby optymalizować przyjęte uprzednio kryteria jakości, przy zdefiniowanych ograniczeniach. Takie poszukiwanie optimum, bazujące na wiedzy eksperckiej lub intuicji, niewątpliwie będzie prowadzić do poprawy jakości sterowania; można je wręcz sformalizować w postaci procedury projektowej. Jednakże dopiero automatyzacja tego procesu wprowadza nową jakość w sterowaniu siecią, dlatego iż gwarantuje wydajność i determinizm algorytmu, chroniąc jednocześnie przed ludzkimi błędami. Zmiana jakościowa wynika

z faktu, że sterowanie automatyczne nie popada w rutynę, zawsze szukając rozwiązania od podstaw, i dlatego jest w stanie wyliczać sterowania, których człowiek nie zdołałby w sposób ciągły i powtarzalny wyznaczać. Automatyzacja procesu harmonogramowania tłoczenia ukazuje swoje walory zwłaszcza w sytuacjach nietypowych: wyłączeń w systemie, podłączenia nowego, dużego odbiorcy, mocno zmiennych profili zapotrzebowania.

Zautomatyzowane określanie strategii tłoczenia gazu jest problemem aktualnym: symulator SIMONE został wyposażony w moduł wyznaczania stacjonarnej (stałej na danym horyzoncie) optymalnej strategii tłoczenia gazu, tj. konfiguracji i punktu pracy wszystkich elementów sieci. Ta funkcjonalność symulatora została wykorzystana w wielu wdrożeniach. Trudniejsze podejście, zakładające niestacjonarną politykę sterowania, również jest przedmiotem badań, przedstawionych np. w publikacjach [2, 5].

W niniejszym artykule zaprezentowano system automatycznego harmonogramowania tłoczenia gazu na horyzoncie dobowym, wdrożony i użytkowany przez trzy lata we wrocławskim oddziale firmy Gaz-System SA. Założono, że system będzie stosował niestacjonarną politykę sterowania, podobnie jak w wyżej wspomnianych publikacjach. Schemat sieci oddziału wrocławskiego przedstawiono na rysunku 1.

Głównym zadaniem dwóch tłoczni, w Jeleniowie i w Krzywej, jest przetłaczanie gazu importowanego z Niemiec przez punkt poboru Lasów. W okresie letnim występuje nadwyżka



Rys. 1. Schemat sieci oddziału wrocławskiego

importowanego gazu względem sumy odbiorów w okręgu; nadwyżka ta jest przesyłana poza sieć podległą Oddziałowi w celu zmagazynowania lub wykorzystania. W okresie zimowym typowo występuje niedobór gazu w okręgu; gaz wówczas pobierany jest dodatkowo z systemów sąsiednich. Krótkoterminowe, dobowe wahania zapotrzebowania mogą być dodatkowo niwelowane poprzez wykorzystanie objętości geometrycznej gazociągów w celu magazynowania gazu.

System automatycznego harmonogramowania steruje przepływami dwóch tłoczni, minimalizując zużycie gazu paliwowego, z jednoczesnym uwzględnieniem realizacji zakontraktowanego strumienia gazu z Niemiec oraz szeregu ograniczeń technologicznych narzuconych na zmienne procesowe. System posługuje się numerycznym modelem sieci

dostarczonym przez symulator SIMONE oraz prognozami, nominacjami i bieżącymi pomiarami stanu sieci pochodzącymi z systemów zewnętrznych (SCADA, system prognozowania, system nominacji). Dane agregowane są przez system EDS II (Enterprise Data Server, rozwiązanie firmy Transition Technologies), który stanowi platformę systemu automatycznego harmonogramowania [1]. W artykule przedstawiono kolejno: zapis formalny zadania optymalizacji i dyskusję nt. dekompozycji zadania i ostatecznej struktury sterowania, sposób rozwiązania założonego zadania optymalizacji tłoczenia na zadanym horyzoncie (uwzględniającego równowagę przebiegu poszczególnych sprężarek), istotne zagadnienia implementacji systemu, wreszcie – analizę wyników numerycznych i wnioski z pracy systemu.

### Zadanie optymalizacji

Głównym zadaniem systemu jest minimalizacja wskaźnika jakości  $Q$ , zdefiniowanego jako suma ilości gazu paliwowego zużytego przez sprężarki obu tłoczni na horyzoncie sterowania  $\Delta T$  od chwili bieżącej  $t_0$  – czyli w okresie czasu, na który opracowywany jest harmonogram tłoczenia:

$$Q = \int_{t=t_0}^{t_0+\Delta T} Q_J(x_J(t), h_J(t), p_J(t)) + Q_K(x_K(t), h_K(t), p_K(t)) dt \quad (1)$$

gdzie  $Q_J(x_J(t), h_J(t), p_J(t))$  i  $Q_K(x_K(t), h_K(t), p_K(t))$  oznaczają odpowiednio chwilowe zużycia gazu przez tłocznie w Jeleniowie i Krzywej, zależne od aktualnej wartości przepływu przez tłocznię  $x(t)$  [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ], sprężu  $h(t)$  oraz ciśnienia ssania  $p(t)$ . Sterowaniami w zadaniu (1) są zakładane przepływy przez tłocznie, które w wyniku równomiernej dyskretyzacji funkcją schodkową w  $N$  chwilach sterowania  $t_0, t_1 = t_0 + \delta t, \dots, t_{N-1} = t_0 + (N-1)\delta t$  dają wektor  $2N$  zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{x}$ :

$$\mathbf{x} = [x_J(t_0), x_K(t_0), \dots, x_J(t_{N-1}), x_K(t_{N-1})] \in \mathcal{R}^N \quad (2)$$

Sterowaniami w zadaniu (1) są również zakładane konfiguracje pracy różnych urządzeń sieciowych w kolejnych chwilach dyskretyzacji sterowania. Jeśli konfiguracja w danej chwili opisywana jest przez  $K$  wartości binarnych, wówczas wektor zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{s}$  będzie miał  $KN$  elementów:

$$\mathbf{s} = [s_1(t_0), \dots, s_1(t_{N-1}), \dots, s_K(t_0), \dots, s_K(t_{N-1})] \in \{0;1\}^{KN} \quad (3)$$

Symulowana przez SIMONE odpowiedź sieci na sterowanie zależy również od  $M$  funkcji opisujących prognozowane lub zakładane przepływy brzegowe systemu, temperatury, ciśnienia, stany urządzeń. Określmy zbiór tych funkcji jako  $W = \{w_1(t), \dots, w_M(t)\}$ . Symulowana odpowiedź systemu w chwili  $t$  to wektor zmiennych zależnych opisujący kompletnie stan, w jakim znajdzie się sieć. Oznaczmy wartość wektora zmiennych zależnych w chwili  $t$  przez  $\mathbf{y}(t)$ . Dla określonego stanu

początkowego sieci,  $\mathbf{y}(t_0)$ , zadanie symulacyjnego wyznaczenia  $\mathbf{y}(t)$  w dowolnej chwili  $t$  możemy traktować jako funkcjonal:

$$\mathbf{y}(t) = S(\mathbf{y}(t_0), \mathbf{x}, \mathbf{s}, W) \quad (4)$$

Znajomość stanu początkowego oraz przyjęcie pewnych trajektorii sterowań i prognoz pozwala symulacyjnie wyznaczyć pozostałe przebiegi w systemie, w pełni określające stan sieci. Jako że krok czasowy symulacji jest o rząd wielkości mniejszy od okresu dyskretyzacji sterowania, traktujemy wyznaczone symulacyjnie przebiegi jako ciągłe. Symulacyjne wyznaczenie odpowiedzi systemu jest niezbędne z dwóch powodów:

- 1) spręż i ciśnienia, niezbędne do wyznaczenia wartości funkcji celu (1), są jednymi z przebiegów symulowanych:  $\mathbf{h}, \mathbf{p} \subset \mathbf{y}$ ;
- 2) na wiele przebiegów symulowanych nałożone są dodatkowe ograniczenia.

Zdefiniowane zadanie sterowania (1), (2), (3), (4) podlega ograniczeniom zarówno na zmienne decyzyjne, jak i zmienne zależne:

$$\mathbf{x} \in \langle \mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max} \rangle, \quad \forall_{t \in \langle t_0, t_0 + \Delta T \rangle} \mathbf{y}(t) \in \langle \mathbf{y}_{\min}, \mathbf{y}_{\max} \rangle \quad (5)$$

Ograniczenia na zmienne zależne definiują dodatkowe wymagania stawiane systemowi: np. minimalne i maksymalne ciśnienia, przepływy oraz inne parametry wynikające z technicznych możliwości zarówno samej sieci, jak i wykorzystywanych urządzeń.

Zadania sterowania z ograniczeniami na zmienne zależne wyznaczone w drodze symulacji są trudne, gdyż ograniczenia te nie dają się przedstawić w postaci analitycznej. W takiej sytuacji ograniczenia zostają uwzględniane jako sztucznie wprowadzona do wskaźnika jakości wewnętrzna funkcja kary. Oznacza to rezygnację z zastosowania szybkich metod

gradientowych i – w konsekwencji – konieczność wielokrotnego wywoływania procedury symulacyjnej dla punktów pośrednich, w celu sprawdzenia dopuszczalności rozwiązania. W skrajnych przypadkach procedura symulacyjna może zawieść, sygnalizując potencjalną awarię systemu lub wartości zmiennych decyzyjnych, wyprowadzających symulator poza obszar ważności modelu numerycznego [4]. W opisywanym przypadku optymalizacji sterowania siecią gazową posłużono się algorytmem optymalizacji Powella [6], przedstawionym dalej w szczegółach.

Optymalizacja dynamiczna minimalizująca (1) okazuje się w praktyce działań dyspozytorów systemu tylko jednym z kryteriów sterowania systemem. Oczywiście w sensie wdrażania systemów komputerowych wsparcia decyzyjnego jest ona najistotniejsza, ponieważ wymaga skomplikowanych i czasochłonnych operacji, których nie można zastąpić decyzjami eksperckimi nawet najbardziej doświadczonych pracowników. Należy jednak pamiętać, że oprócz celów odległych (a więc również obciążonych błędem prognozy) sterowanie ma zapewnić przede wszystkim bezpieczne bieżące działanie systemu oraz skupiać się na minimalizacji bieżącego zużycia gazu paliwowego sprężarek.

Sformułowanie zadania sterowania jest więc w gruncie rzeczy wielokryterialne (dodatkowe kryterium stanowi również równoważenie obciążeń sprężarek). Mamy zatem optymalizację strategiczną oraz, działającą w zupełnie innej

skali czasowej, bieżące sterowanie obiektem, realizujące również logikę zabezpieczeń. Dlatego też wykonany system sterowania ma strukturę hierarchiczną (por. rys. 2), w której warstwę nadrzędną stanowi moduł optymalizacji, a warstwę regulacji bezpośredniej realizuje układ zbudowany z regulatorów PID; układ ten realizuje również funkcje zabezpieczeń systemu. Pierwotny problem wielokryterialny został zeskalaryzowany: rozwiązanie (1), wyznaczone w module optymalizacyjnym, jest przekazywane do warstwy regulacji bezpośredniej jako wartość wiodąca, do której warstwa regulacji bezpośredniej będzie zmierzać, o ile pozwolą na to ograniczenia technologiczne.

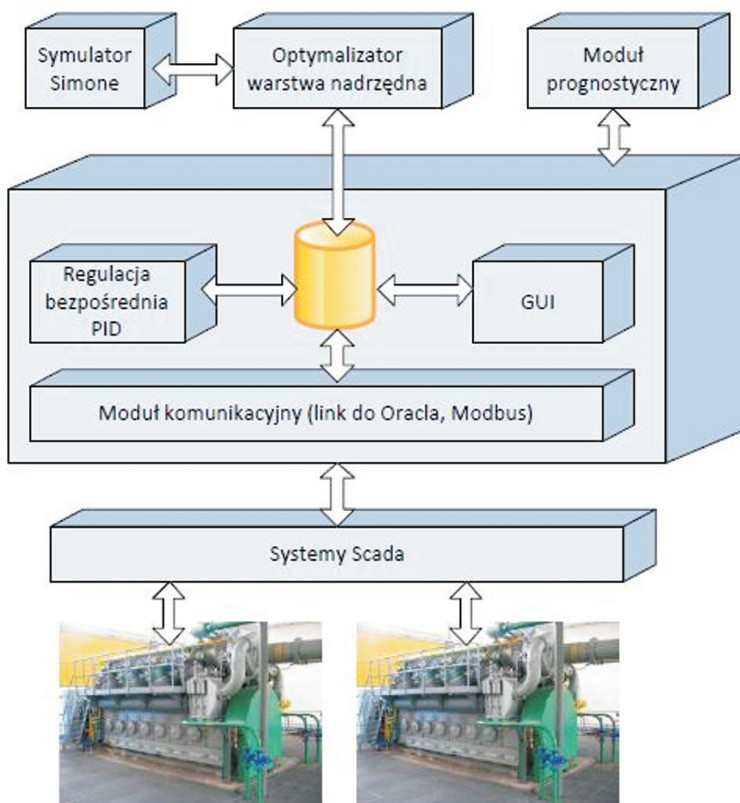
Obecny, równoległy układ tłoczenia wynika z niedawnej rozbudowy sieci, polegającej na dodaniu rurociągu bezpośrednio łączącego tłocznię w Jeleniowie z ostatnim fragmentem istniejącego wcześniej rurociągu Krzywa–pętla wrocławska [3]. Przed tą modernizacją tłocznie pracowały w układzie szeregowym, co wymuszało konieczność ścisłej koordynacji sterowań wystawianych przez oba regulatory PID, gdyż pojemność sieci pomiędzy Krzywą a Jeleniowem była mała w stosunku do przepływów i każda istotna rozbieżność pomiędzy przepływami obu tłocznii powodowała szybką, niepożądaną zmianę ciśnienia w tym fragmencie sieci.

Po przebudowie interferencja działania obu tłocznii po stronie wyjściowej jest w olbrzymim stopniu tłumiona przez objętość całego systemu gazociągów leżących za tłoczniami.

Natomiast po stronie tłoczącej zadania układu regulacji determinuje punkt poboru gazu w Lasowie. Jako że ciśnienie gazu dostarczanego przez stronę niemiecką podlega fluktuacjom, głównym bieżącym zadaniem regulatorów PID jest takie sterowanie tłoczniami, aby spadek ciśnienia na zaworze regulacyjnym w Lasowie był minimalny – ale odpowiednio duży, by utrzymać możliwość sterowania przepływem. Zachowanie zakontraktowanego przepływu w Lasowie jest równie istotnym zadaniem w systemie co utrzymanie wszystkich parametrów dostarczanego gazu dla odbiorców. Dodatkowo warstwa regulacji bezpośredniej ma na celu utrzymanie parametrów technologicznych pracy sprężarek (tj. ciśnienia wejściowe i wyjściowe, obroty, temperatury na wyjściu) w zakresie bezpiecznym.

W klasycznym regulatorze PID cała wiedza o systemie zawiera się w wartościach trzech jego parametrów. W przypadku omawianego projektu regulator musi uwzględniać dodatkowo dwa czynniki:

1. *informację o optymalnej trajektorii sterowania wyznaczonej przez moduł optymalizacji* – informacja ta wprowadzana jest jako korekta aktualnych wartości sterowań. W ten sposób, zakłócając niejako regularne działanie PID, antycypujemy przyszłe



Rys. 2. Bloki funkcjonalne i przepływ informacji w systemie

zmiany stanu sieci, nieoptymalne w sensie bieżącego sterowania, ale optymalne w sensie długookresowym;

2. *dynamikę tłoczni* – regulator PID ma wgląd w aktualny stan każdej ze sprężarek wchodzących w skład tłoczni, zna jej nominalne parametry ruchowe i ograniczenia – w szczególności typowy zakres obrotów oraz maksymalne temperatury, obroty i ciśnienia. W razie przekraczania jakichkolwiek marginesów bezpieczeństwa, wystawiane ciśnienie sterujące jest dla odpowiedniej sprężarki obniżane. Opisywane procedury wykonywane są przed

ostatecznym wystawieniem wartości sterujących; mają zatem pierwszeństwo przed logiką samego PID i korekcjami od optymalizatora, opisanymi w punkcie powyżej.

Ponadto w regulatorze PID zaimplementowany został mechanizm śledzenia, który polega na takiej modyfikacji wewnętrznej wartości członu całkującego, żeby w momencie załączenia algorytmu w tryb AUTO wyjście wyliczone przez regulator PID odpowiadało bieżącej wartości sterowania. Mechanizm śledzenia zapewnia bezuderzeniowe załączenie układu automatyki.

## Algorytm optymalizacji

Algorytm optymalizacji oparty jest na działaniu algorytmu regulacji predykcyjnej z przesuwającym horyzontem [8]. Optymalizator używa numerycznego symulatora SIMONE jako modelu wewnętrznego – oprogramowanie to już od kilkunastu lat jest obecne w każdym z oddziałów firmy Gaz-System i wykorzystuje się je do symulacji scenariuszy operacyjnych. Główną zaletą wynikającą z takiego podejścia jest aktualność modelu, który wraz ze zmianami fizycznymi w sieci podlega ciągłej aktualizacji przez personel odpowiedzialny za symulacje. Ponadto wykorzystanie istniejącego modelu znacząco zredukowało czas realizacji projektu – 90% czasu w projektach optymalizacyjnych przeznaczają się na zbudowanie modelu procesu. Podejście takie ma jednak podstawową wadę, jaką jest niedostępność modelu sieci w postaci analitycznej. Ograniczenie to znacząco redukuje spektrum możliwych do zastosowania metod optymalizacyjnych. Ten warunek był głównym powodem wyboru jako metody optymalizacji algorytmu Powella, który należy do grupy metod kierunków sprzężonych. Jest to bezgradientowa, iteracyjna metoda optymalizacji bez ograniczeń. Dla form kwadratowych metoda znajduje optimum w liczbie kroków równej liczbie zmiennych decyzyjnych. Idea metody polega na badaniu zachowania optymalizowanej funkcji poprzez wykonywanie kroków względem najlepszego dotychczas znalezionego rozwiązania wzdłuż określonych kierunków stanowiących tzw. bazę. Zasadniczą cechą wyróżniającą metodę Powella polega na tym, że baza zmienia się w trakcie wykonywania algorytmu. Modyfikacja bazy polega na stworzeniu i dodaniu do niej nowego sprzężonego kierunku i równoczesnym usunięciu z niej takiego kierunku, wzdłuż którego nastąpiło największe przesunięcie.

Główny problem w wykorzystywaniu bezgradientowych algorytmów optymalizacji w zastosowaniach praktycznych (w których funkcja celu nie jest formą kwadratową) stanowi konieczność oszacowania wartości funkcji celu w bardzo wielu punktach. Jeśli – jak w opisywanym przypadku – czas pojedynczego oszacowania funkcji celu jest długi, bo

zdeteminowany czasem wykonania symulacji SIMONE, problemem staje się znalezienie dobrego przybliżenia rozwiązania w akceptowalnym czasie. Problem ten rozwiązano poprzez implementację bufora pamiętającego wartości funkcji celu (1) dla danego punktu w przestrzeni sterowań. W sytuacji, kiedy w kolejnym kroku algorytmu optymalizacji pojawiała się konieczność wyznaczenia wartości funkcji celu dla punktu, który już został przeanalizowany, lub punktu nieodległego, wartość funkcji celu pobierana była z bufora. Ta modyfikacja, polegająca w istocie na dyskretyzacji krajobrazu optymalizowanej funkcji, przyspieszyła obliczenia w stopniu pozwalającym na użycie algorytmu.

W problemie założono, że zadanie optymalizacji trajektorii sterowania na horyzoncie dobowym będzie powtarzane co 15 min, głównie aby reagować na bieżące, szybkozmienne przebiegi ciśnień w Lasowie (wynikające zasadniczo ze zmian ciśnienia po stronie niemieckiej). Przy założonym limicie czasu 15 min na optymalizację i średnim czasie symulacji systemu równym 5 s daje to budżet 180 oszacowań funkcji celu dla znalezienia optimum. Nawet przy wykorzystaniu bufora funkcji celu może to być zbyt mało, dlatego wdrożono dwa dalsze usprawnienia algorytmu:

1. Jeśli dokładność znalezionej trajektorii jest niewystarczająca, zostaje zwrócone rozwiązanie znalezione w ostatniej pomyślnej sesji optymalizacji. Takie przesunięcie trajektorii jest nieistotne ze względów strategicznych, a o bieżące zabezpieczenie odpowiednich parametrów pracy tłoczni i zaworu w Lasowie dba w sposób wystarczający moduł regulacji bezpośredniej. Przy następnej optymalizacji kontynuowana jest przerwana uprzednio optymalizacja.
2. Zmienne decyzyjne związane ze sterowaniem tłoczniami w Jeleniowie i w Krzywej okresowo zamieniają się kolejnością w wektorze  $x$ , dzięki czemu traktowane są z równą uwagą przez algorytm Powella. Dyskretne zmienne decyzyjne nie wchodziły w skład problemu optymalizacji rozwiązywanego metodą Powella. Bieżąca

konfiguracja tłoczni jest odczytywana z systemu SCADA, a ewentualne rekonfiguracje na horyzoncie sterowania zostały uwzględnione w regułach sterowania tłoczeniem i osadzone w systemie SIMONE. Dzięki temu uniknięto konieczności rozwiązywania mieszanego zadania optymalizacji, tj. zawierającego zmienne decyzyjne o charakterze ciągłym i dyskretnym.

Postulat równoważenia przebiegu (godzin pracy) sprężarek oznacza wprowadzenie kolejnego kryterium do problemu.

## Struktura oprogramowania

Struktura oprogramowania odpowiada schematowi z rysunku 2, obrazującemu pełny przepływ informacji pomiędzy poszczególnymi modułami. Głównym elementem rozwiązania jest system EDS II, który wykorzystany został do integracji danych procesowych i pełni rolę warstwy magazynowania i przenoszenia danych. Użycie systemu EDS II jako niezależnej platformy pozwoliło odseparować dane operacyjne systemów SCADA od danych obliczeniowych zadania optymalizacji, dzięki czemu praca systemu optymalizacji nie ma żadnego wpływu na efektywność pracy systemu SCADA.

System EDS II współpracuje z systemem TelWin (system SCADA w dyspozytorni firmy Gaz-System), z którego na bieżąco, poprzez dedykowany link do bazy systemu TelWin (do bazy danych Oracle), pozyskuje wolnozmienną dane – tj. przepływy i ciśnienia. Dane szybkozmienną związane z pracą tłoczni, takie jak: obroty sprężarek, ciśnienie przed i za sprężarkami, temperatury na chłodnicach, pobierane są przez Modbus bezpośrednio z serwera InTouch (system SCADA na tłoczniach). Wszystkie informacje są kolekcjonowane w lokalnej bazie systemu EDS II i moduły obliczeniowe w każdej chwili mają do nich dostęp.

Dane o przepływach wykorzystywane są przez moduł prognostyczny, który na podstawie historii wartości wyznacza w trybie on-line dobowe profile. Profile są skalowane przez bieżącą i prognozowaną wartość temperatury. Dodatkowo zastosowany algorytm wyposażono w mechanizm uczenia, dzięki czemu potrafi adaptować profil do zmieniających się warunków, takich jak przyłączenie nowych odbiorców czy zmiany poborów spowodowane czynnikami ekonomicznymi. Wyliczone profile poborów zostają przesłane do systemu EDS II, gdzie dostępne są dla modułów symulatora SIMONE i modułu optymalizacji. Obecnie coraz częściej prognozy zapotrzebowania zastępowane są nominacjami, czyli profilami dobowymi przesyłanymi przez odbiorców hurtowych lub narzuconymi przez Krajową Dyspozycję Gazu.

Moduł optymalizacji realizuje opisane powyżej zadanie optymalizacji (regulacji nadrzędnej), co sprowadza się do wyliczania najkorzystniejszych trajektorii sterowań (wektory wartości przepływów przez tłocznie) na podstawie modelu

Inaczej niż w przypadku postulatu utrzymywania stałego zapasu regulacji w Lasowie, konflikt rozwiązano poprzez sugerowanie operatorowi aktualnej, równoważącej przebieg, konfiguracji sprężarek. Algorytm równoważenia pracy sprężarek działa zatem zawsze w trybie doradczym, pozostawiając człowiekowi wybór pomiędzy oboma kryteriami. To operator decyduje, kiedy faktycznie wyłączyć najwydajniejszą (i dlatego z reguły najdłuższą pracującą) sprężarkę w systemie.

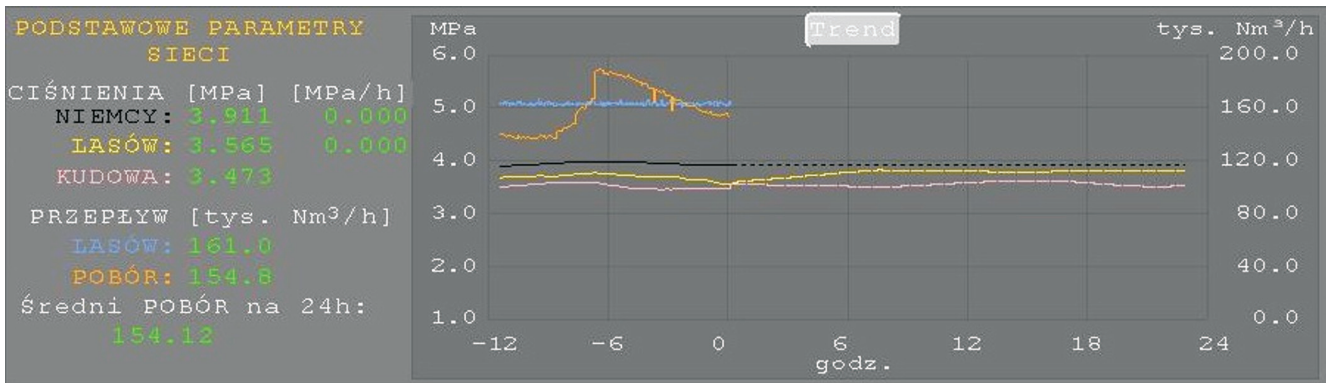
sieci SIMONE, prognozy poborów (dostępnej z modułu prognostycznego) i aktualnej sytuacji sieci i sprężarek. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzane są w sposób gwarantujący spełnienie poniższych wymagań technicznych:

- praca na danych w trybie on-line (dla danych bieżących), z uwzględnieniem możliwości wystąpienia danych niepewnych (błędnych),
- dostępność wyników dla operatora po każdej wykonanej optymalizacji,
- horyzont optymalizacji – 24 godziny,
- obliczenia przeprowadzane są na w pełni funkcjonalnym schemacie sieci wykorzystywanym obecnie przez OGP Gaz-System Oddział we Wrocławiu do wykonywania symulacji on-line,
- aplikacja przedstawia optymalny (najlepszy znaleziony) wariant z uwzględnieniem wszystkich ograniczeń wprowadzonych przez operatora i wynikających z parametrów technicznych systemu przesyłowego; wyniki pokazywane są na każdym punkcie pomiarowym w postaci wykresu; dyspozytor po otrzymaniu wyników ma możliwość prześledzenia zmiany ciśnienia i przepływu w każdym punkcie pomiarowym z wyprzedzeniem co najmniej 24 godzin.

Wyniki obliczeń zrealizowane przez warstwę regulacji nadrzędnej przekazywane są do regulatora korekcyjnego. Regulator korekcyjny w opisywanym rozwiązaniu stanowi warstwę sterowania bezpośredniego, której zadaniem jest bieżące (raz na 10 s) korygowanie wartości wyliczonych przez moduł optymalizacji na podstawie bieżącego pomiaru:

- ciśnienia wejściowego tłoczni,
- ciśnienia wyjściowego z tłoczni,
- obrotów maszyn,
- temperatury gazu za chłodnicą,
- ciśnienia po stronie niemieckiej,
- ciśnienia po stronie polskiej.

Dodatkowym zadaniem regulatora korekcyjnego jest utrzymywanie równych obrotów maszyn na tłoczniach. Dane wejściowe modułu korektora pobiera bezpośrednio z systemu EDS II, wartości wyliczone również przekazywane są do systemu EDS II, skąd poprzez Modbus przesyłane są do



Rys. 3. Grafika kluczowych parametrów sieci: odnotowany dotychczas łączny odbiór gazu z systemu (wykres w kolorze pomarańczowym) oraz pobór w Lasowie (niebieski). Ponadto kolorami żółtym i różowym oznaczono odpowiednio odnotowane (linia ciągła) i zaplanowane (linia przerywana) optymalne przebiegi ciśnienia za zaworem w Lasowie oraz na peryferiach systemu, w Kudowie. Wykres czarny dotyczy odnotowanego i przewidywanego ciśnienia przed zaworem redukcyjnym w Lasowie

serwerów tłoczni jako sterowania. Skalaryzacja obu kryteriów (zachowania różnicy ciśnień na zaworze regulacyjnym wobec minimalizacji zużycia gazu paliwowego na horyzoncie dobowym) odbywa się poprzez wprowadzenie symulowanego przez SIMONE aktualnego optymalnego ciśnienia wyjściowego, jako korekty bieżących sterowań wyznaczanych przez regulator dyskretny PID.

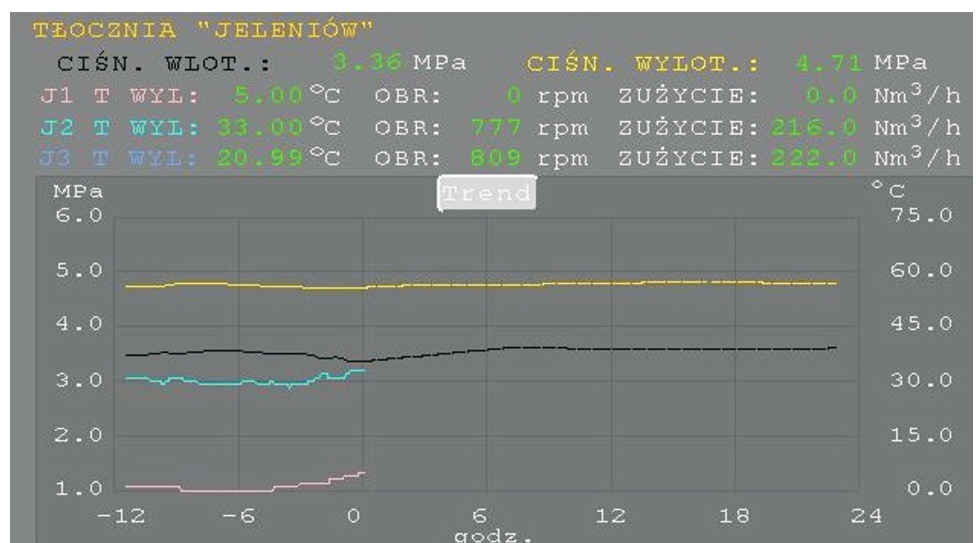
System optymalizacji pracy tłoczni może działać w dwóch trybach (wybieranych przez operatora): doradczym oraz automatycznym. W obu z nich operator zobowiązany jest do określenia aktualnego stanu tłoczni (pracuje lub nie pracuje), co ma bezpośredni wpływ na obliczenia optymalizacyjne. W trybie doradczym za ustawianie zadanej wartości ciśnienia na sprężarkach odpowiada operator. W trybie automatycznym wartości ciśnienia na poszczególnych sprężarkach ustawiane są automatycznie. Tryb automatyczny może zostać w każdej chwili wyłączony przez operatora, który przejmuje wówczas sterowanie nad maszynami.

Zarówno w trybie doradczym, jak i automatycznym operator może określać limity parametrów technologicznych tłoczni, takich jak:

- maksymalna temperatura wyjściowa,
- maksymalne ciśnienie wyjściowe,
- minimalne ciśnienie ssania,
- maksymalne obroty,
- zakładana różnica ciśnień na zaworze w Lasowie (globalnie dla systemu).

Prawidłowe wartości tych parametrów pozwalają na bezpieczne prowadzenie procesu, bez ryzyka odstawienia tłoczni czy uszkodzenia maszyn.

Ponadto operator ma możliwość wyświetlenia w postaci trendu w systemie EDS II historycznych, aktualnych i prognozowanych na najbliższe 24 godziny wyników optymalizacji, prognozy zużycia gazu dla poszczególnych stacji, podstawowych parametrów sieci oraz podstawowych parametrów pracy tłoczni. Rysunek 3 prezentuje synoptykę kluczowych zmiennych procesowych oraz zoptymalizowanych trajektorii ciśnień, zrealizowaną w systemie EDS II. Rysunek 4 przedstawia natomiast synoptykę szczegółową tłoczni w Krzywej, złożonej z trzech sprężarek. Dostęp do pozostałych wyników obliczeń i do diagnostyki błędów oraz możliwość edycji parametrów związanych z pracą systemu optymalizacji za-



Rys. 4. Grafika szczegółowa dla tłoczni w Krzywej. Odnotowane i zaplanowane ciśnienia dolotowe i wylotowe tłoczni oznaczono na wykresie liniami czarną i żółtą. Pozostałe linie oznaczają odnotowane temperatury wylotowe gazu dla poszczególnych sprężarek (wartość „0” związana jest z aktualnym brakiem danych)

pewnione są przez pozostałe grafiki procesowe stworzone również w systemie EDS II.

Specyfika wykorzystywanych w opisywanym systemie narzędzi SCADA spowodowała konieczność wdrożenia w warstwie regulacji zarówno mechanizmów weryfikacji poprawności danych pomiarowych, jak i adekwatnego reagowania na dane błędne, sprzeczne, nieaktualne – lub ich całkowity brak. Dla każdego z ww. bieżących pomiarów zdefiniowano zakresy poprawności danych; pomiary

uzyskiwane z dwóch niezależnych torów pomiarowych są uśredniane, o ile każdy z nich mieści się w przewidzianym zakresie. Obsługa sytuacji zaniku danych pomiarowych zależy od ich charakteru: wyznaczono zbiór pomiarów kluczowych, których niedostępność powoduje natychmiastowe zaprzestanie działania regulacji automatycznej; w przypadku pozostałych pomiarów zdefiniowano czasy ich przeterminowania, których przekroczenie kończy działanie regulacji automatycznej.

## Wyniki i wnioski

Przedstawione rozwiązanie zostało wdrożone w firmie Gaz-System w okręgu wrocławskim na zespole tłoczni Jeleniów–Krzywa w 2009 roku i uaktualnione w 2012 roku. Projekt, oprócz wprowadzenia rzeczywistych oszczędności wydatków bieżących, także usystematyzował i wzbogacił wiedzę o obiekcie. Automatyzacja sterowania wymusiła sformułowanie zadania optymalizacji i skonstruowanie modeli numerycznych poszczególnych sprężarek, na podstawie historycznych danych pomiarowych (por. rys. 5). Opracowano również narzędzia i procedury zarządzania bazą punktów procesowych na okoliczność – wcale nierzadkiej – zmiany topologii sieci czy modyfikacji listy odbiorów gazu.

Okres 3 lat eksploatacji bez gruntownych zmian strukturalnych sieci pozwala na obiektywną analizę ilościową pracy układu i ocenę korzyści wynikających z zastosowania oprogramowania optymalizacyjnego. Są to:

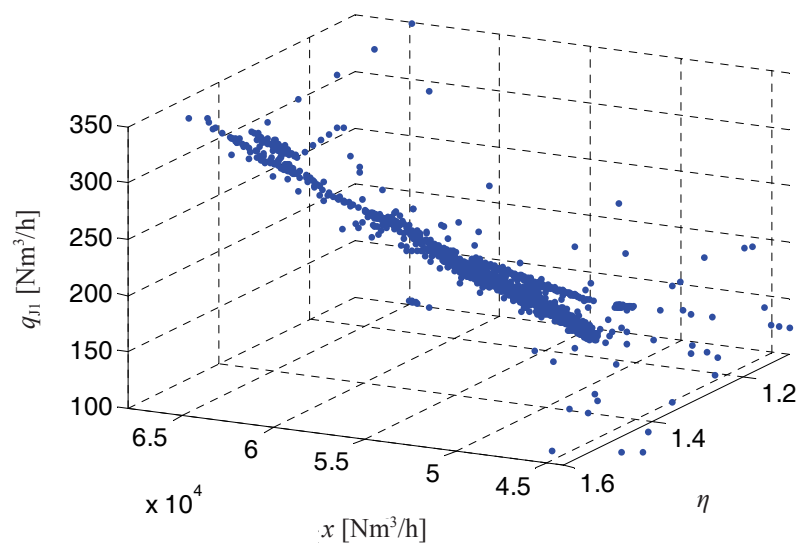
- redukcja wartości spadku ciśnienia na zaworze w Lasowie, czyli minimalizacja strat energii, a co za tym idzie – redukcja zużycia gazu paliwowego i maszyn,
- wyrównanie obciążeń obu tłoczni, jak i obciążeń poszczególnych sprężarek pracujących na tłoczniach,
- odciążenie personelu obsługującego system.

Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że średni spadek ciśnienia gazu na zaworze w Lasowie został zredukowany ponad dwukrotnie. Wyrównanie obciążenia sprężarek obu tłoczni wyeliminowało często występujące przeciążenia tłoczni Krzywa, co znacząco zmniejszyło liczbę występujących na niej awarii. Inwestycja w system zwróciła się po niespełna 2 latach, co pokazuje, że przeznaczanie środków na optymalizację jest opłacalne. Z kolei wspomniana duża inwestycja strukturalna w równoległą linię o dużej średnicy, zasilającą pętlę wrocławską, spowodowała, że uaktualniony system automatyki był wykorzystywany sporadycznie: gaz przez większość czasu płynął dzięki naturalnej różnicy ciśnień, bez potrzeby

uruchamiania tłoczni. Począwszy od 2014 r., w związku z przygotowywanym całkowitym wyłączeniem tłoczni w Krzywej, system nie był wykorzystywany; planowana jest jednak jego kolejna aktualizacja, adekwatnie do nowej topologii sieci.

Ważnym czynnikiem przemawiającym za realizacją tego typu projektów, oprócz aspektów ekonomicznych, jest podniesienie świadomości zarówno kierownictwa, jak i personelu. Kierownictwo zyskało wiedzę odnośnie do wielkości oraz źródeł kosztów, które można zredukować. Personel, obserwując pracę układu optymalizacyjnego, nauczył się, jak obsługiwać instalację i na co zwracać uwagę, żeby koszty pracy były minimalne.

Architektura systemu sterowania umożliwia stosunkowo łatwą obsługę również gruntownych zmian w funkcjonowaniu systemu, np. ewentualnego odwrócenia kierunku przepływu w Lasowie lub dodania kolejnej tłoczni – wymaga to przeprogramowania sterowników PID. Natomiast logika systemu optymalizacji dynamicznej tłoczenia jest uniwersalna:



Rys. 5. Empiryczne zużycie gazu paliwowego  $q$  przez sprężarkę nr 1 w Jeleniowie w funkcji sprężu  $\eta$  i przepływu  $x$ . Większość próbek pomiarowych układu się w pobliżu jednej płaszczyzny, którą można uznać za wystarczająco dokładny liniowy model działania sprężarki. Można sporządzić analogiczne wykresy dla pozostałych maszyn



wszelkie wyznaczone trajektorie są wynikami obiektywnego procesu optymalizacji i nie bazują na praktyce ludzkiej.

Dlatego rozwiązanie to może znaleźć zastosowanie również w innych oddziałach w kraju.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 1, s.

Artykuł nadesłano do Redakcji 24.06.2014 r. Zatwierdzono do druku 8.09.2014 r.

Podziękowania: *Przedstawione wyniki prac badawczych i wdrożeniowych powstały w ramach kontraktów Gaz-System SA Oddział Wrocław z Transition Technologies SA na wykonanie i modernizację systemu optymalizacji tłoczenia gazu.*

## Literatura

- [1] EDS. Transition Technologies SA. <http://www.tt.com.pl/produkty-i-uslugi/sektory/przemysl/eds> (dostęp: 11.11.2012).
- [2] Ehrhardt K., Steinbach M.: *Nonlinear optimization in gas networks*. [W:] Bock H. G., Phu H. X., Kostina E., Rannacher R. (eds.): *Modeling Simulation and Optimization of Complex Processes*. Springer-Verlag 2005, pp. 139–148.
- [3] *Gazociąg Jeleniów – Dziwiszow dofinansowany ze srodkow Unii Europejskiej*. Gaz-System SA. <http://www.gaz-system.pl/centrum-prasowe/aktualnosci/informacja/artypul/7455/> (dostęp: 26.11.2012).
- [4] Kamola M.: *Hybrid Approach to Design Optimisation: Preserve Accuracy, Reduce Dimensionality*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 2007, vol. 27, no. 1, pp. 53–71.
- [5] Osiadacz A.: *Dynamic Optimization of High Pressure Gas Networks*. Referat z konferencji PSIG Annual Meeting, Pipeline Simulation Interest Group, 1994.
- [6] Powell M. J. D.: *An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives*. Computer Journal 1964, vol. 7, issue 2, pp. 155–162.
- [7] *SIMONE SOFTWARE – System Description*. SIMONE Research Group. <http://www.simone.eu/simone-simonesoftware.asp> (dostęp: 21.11.2012).
- [8] Tatjewski P.: *Sterowanie zaawansowane obiektow przemyslowych*. Warszawa, Wyd. EXIT, 2002.



Dr inż. Mariusz Kamola  
Adiunkt, Politechnika Warszawska Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej oraz Transition Technologies  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa  
E-mail: [M.Kamola@ia.pw.edu.pl](mailto:M.Kamola@ia.pw.edu.pl)



Dr inż. Sebastian PLAMOWSKI  
Emerson Process Management Power & Water Solutions  
ul. Stefana Batorego 16A  
05-825 Grodzisk Mazowiecki  
E-mail: [Sebastian.Plamowski@gmail.com](mailto:Sebastian.Plamowski@gmail.com)



Śp. inż. Czesław GODLEJEWSKI  
Były kierownik Oddziałowej Dyspozycji Gazu w Oddziale Wrocław Operatora Gazociągów Przesyłowych Gaz-System S.A.



Mgr inż. Krzysztof ANTONIEWICZ  
Zastępca Kierownika  
Oddziałowa Dyspozycja Gazu  
Gaz-System Oddział we Wrocławiu  
ul. Gazowa 3  
50-513 Wrocław  
E-mail: [krzysztof.antoniewicz@gaz-system.pl](mailto:krzysztof.antoniewicz@gaz-system.pl)



Mgr inż. Adam GROMNICKI  
Zastępca Kierownika  
Gaz-System Oddział we Wrocławiu  
ul. Gazowa 3  
50-513 Wrocław  
E-mail: [adam.gromnicki@gaz-system.pl](mailto:adam.gromnicki@gaz-system.pl)