

Michał WARCHOL*, Mirosław DYRDA**

System do zintegrowanej optymalizacji pracy podziemnych magazynów gazu

STRESZCZENIE: Dokument przedstawia opis koncepcji realizacji systemu do optymalizacji pracy podziemnych magazynów gazu typu kawernowego. Opisane w dokumencie algorytmy opracowane przez Transition Technologies pozwalają na ujęcie w jednym wieloetapowym zadaniu optymalizacji pracy całej infrastruktury magazynu (kawerny oraz instalacja naziemna, w tym sprężarki). Celem jest wyznaczenie optymalnego zestawu pracujących urządzeń, połączeń między nimi oraz przepływu gazu, który minimalizuje koszty operacyjne pracy magazynu. Algorytmy opracowane zostały dla uogólnionej struktury magazynu, co umożliwia ich zastosowanie do optymalizacji pracy magazynów o różnych strukturach. Rozważono m.in. strukturę magazynu z szeregowo połączonymi bateriami sprężarek, co powoduje istotny wzrost trudności obliczeniowej. Zastosowano szereg nowoczesnych algorytmów i procedur obliczeniowych w celu uzyskania wysokiej precyzji obliczeń, jak również szybkości działania. Dzięki temu opracowane rozwiązanie może zostać wykorzystane do efektywnego planowania operacyjnego pracy magazynu na krótkim horyzoncie, wspierając operatorów technicznych magazynu w codziennych obowiązkach i pozwalając na osiągnięcie oszczędności w zużyciu energii.

SŁOWA KLUCZOWE: gaz ziemny, podziemny magazyn gazu, optymalizacja, oprogramowanie, sprężarka, kawerna, planowanie, minimalizacja kosztów

* Dr inż. – Transition Technologies S.A.; e-mail: M.Warchol@tt.com.pl

** Mgr inż. – Transition Technologies S.A.; e-mail: M.Dyrda@tt.com.pl

Wprowadzenie

Czynniki takie jak sezonowość zużycia gazu ziemnego przez odbiorców, czasochłonność procesu eksploracji złóż i transportu gazu, aktualna sytuacja geopolityczna mogą być przyczyną istotnych deficytów gazu w okresach wysokiego zużycia, jak również wpływają na dużą zmienność cen gazu w ciągu roku.

Wspomniane problemy dotyczą zarówno odbiorców indywidualnych, jak i całe sektory gospodarki wykorzystujące paliwo gazowe. Odpowiedzią na nie jest proces magazynowania gazu. Podziemne magazyny gazu są to podziemne przestrzenie o dużej pojemności magazynowej, do których może być wtłaczany gaz celem późniejszego jego wykorzystania. Dzięki wykorzystaniu podziemnych magazynów łagodzone są skutki wahań zapotrzebowania oraz zapewnione jest bezpieczeństwo energetyczne poprzez zachowanie strategicznych rezerw na wypadek przerw w dostawach paliwa gazowego. Magazynowanie gazu pozwala również na optymalizację procesu wydobycia gazu oraz rozmiarów i wydajności sieci transmisyjnej.

Firma Transition Technologies S.A. posiada wieloletnie doświadczenie związane z produkcją i wdrażaniem rozwiązań informatycznych wspierających zarządzanie pracą podziemnych magazynów gazu. Intensywne prace badawcze i rozwojowe prowadzone w zakresie aplikacji dla rynku gazu realizowane od 2006 roku doprowadziły do zbudowania portfolio produktów gasLUX dedykowanych dla operatorów podziemnych magazynów gazu. W skład gasLUX wchodzi narzędzia informatyczne wspierające zarówno procesy komercyjne, takie jak zarządzanie kontraktami, obsługa bieżących nominacji na zatłaczanie i odbiór gazu z magazynu, rozliczanie zrealizowanych usług, raportowanie itp., jak również procesy techniczne. W dziedzinie technicznej Transition Technologies S.A. kładzie główny nacisk na narzędzia pozwalające na monitorowanie, symulację i optymalizację kluczowych procesów technologicznych związanych z magazynowaniem gazu.

W latach 2013–2015 Transition Technologies realizowało projekt dofinansowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (projekt nr: POIG.01.04.00-00-190/13). Celem projektu było opracowanie innowacyjnego rozwiązania informatycznego, pozwalającego na kompleksową optymalizację pracy podziemnego magazynu gazu zbudowanego w kawernach solnych. W wyniku przeprowadzonych prac badawczych oraz rozwojowych opracowane zostały algorytmy matematyczne oraz prototyp oprogramowania, które w przyszłości rozszerzy portfolio produktów gasLUX.

1. Opis problemu

Wyróżniamy trzy podstawowe typy podziemnych magazynów gazu:

- ◆ magazyny kawernowe – w specjalnie do tego celu przygotowanych kawernach solnych, powstałych poprzez wyługowanie części soli ze złoża,
- ◆ magazyny w wyeksploatowanych złożach gazu lub ropy naftowej,
- ◆ magazyny w strukturach zawodnionych.

Poszczególne typy magazynów różnią się od siebie znacząco jeżeli chodzi o koszty realizacji, pojemności magazynów, zdolności zatłaczania i odbioru czy sposób eksploatacji.

Magazyny kawernowe charakteryzują się możliwością uzyskania dużych przepływów w stosunku do ich pojemności czynnych. Pojemność czynna magazynów kawernowych jest natomiast na ogół znacząco niższa w porównaniu np. do magazynów zlokalizowanych w wyeksploatowanych złożach gazu lub ropy naftowej. Istotną cechą magazynów kawernowych jest możliwość realizacji wielu cykli zatłaczania i odbioru w ciągu roku. W przypadku magazynów zlokalizowanych w wyeksploatowanych złożach w ciągu roku odbywa się na ogół jeden cykl zatłaczania i jeden cykl odbioru.

Opisane cechy powodują, że magazyny kawernowe są szczególnie przydatne w przypadku gwałtownego wzrostu zapotrzebowania na gaz ziemny oraz umożliwiają regulowanie krótkotrwałych wahań popytu. W związku z powyższym optymalizacja pracy magazynów kawernowych może przyczynić się do znacznych benefitów ekonomicznych dzięki efektywnemu wykorzystaniu elastyczności oferowanej przez ten typ magazynów.

Efektywne prowadzenie magazynów w takim trybie jest zadaniem trudnym, wymagającym od operatorów ogromnego doświadczenia oraz znajomości procesów zachodzących w magazynie.

Tu z pomocą przyjść może wsparcie informatyczne, które wykorzystując kompleksowy model magazynu zarekomenduje operatorowi, jak poprowadzić proces w sposób bezpieczny oraz najkorzystniejszy z punktu widzenia ekonomicznego.

2. Opis koncepcji systemu do zintegrowanej optymalizacji podziemnych magazynów gazu

2.1. TSMS – ogólne informacje

Techniczna część portfolio produktów gasLUX opracowanego przez Transition Technologies nosi nazwę TSMS (Technical Storage Management System) i aktualnie składa się z szeregu komponentów, funkcjonujących w trzech obszarach: informacji, symulacji i optymalizacji.

Komponenty z obszaru informacji odpowiadają za akwizycję danych pomiarowych z systemu automatyki zainstalowanego na obiekcie, przetwarzają wstępnie dane pomiarowe w celu wyznaczenia wskaźników reprezentujących jakość realizowanych procesów technologicznych oraz zapewniają informacje dotyczące planów remontowych i działań utrzymaniowych, co jest wymagane do określenia dostępności poszczególnych urządzeń biorących udział w procesie.

Komponenty umieszczone w obszarze symulacji pozwalają na precyzyjne zasymulowanie zachowania infrastruktury magazynu w zależności od przewidywanego lub zatwierdzonego przepływu gazu do/z magazynu. Podstawą działania komponentów tej warstwy są dokładne modele części podziemnej magazynu oraz infrastruktury nadziemnej.

Transition Technologies opracowało dotychczas dwa produkty pracujące w obszarze optymalizacji. Jest to oprogramowanie CEP (Compressor Energy Prognosis) służące optymalizacji pracy stacji kompresorowych oraz SOE (Storage Operation Expert) wspierające realizację określonej strategii wykorzystania kavern oraz infrastruktury naziemnej magazynu (Wojdan i in. 2014).

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję rozwiązania umożliwiającego optymalizację pracy całego podziemnego magazynu gazu poprzez uwzględnienie w zadaniu optymalizacji zarówno sprężarek, jak i innych urządzeń naziemnych oraz stanu struktur podziemnych magazynu.

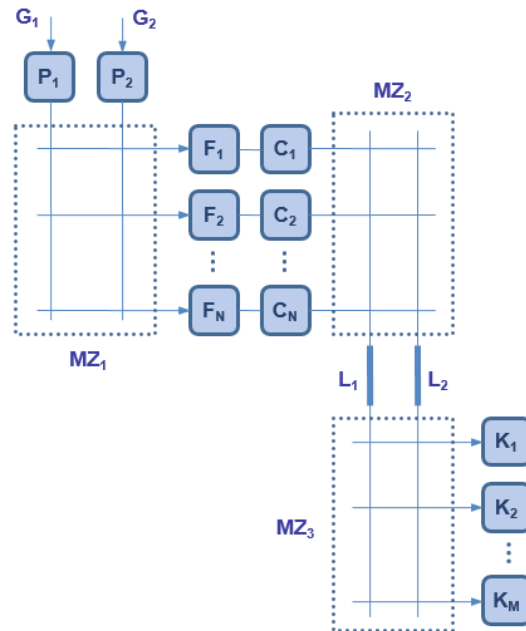
2.2. Uogólniony model magazynu

Kluczowym założeniem jest zapewnienie uniwersalności rozwiązania pozwalającej na zastosowanie go dla magazynów o różnych strukturach połączeń elementów infrastruktury. Po przeanalizowaniu szeregu różnych struktur magazynu zaproponowano uogólniony opis modelu magazynu obejmujący następujące komponenty:

- ◆ urządzenia naziemne przetwarzające gaz przed umieszczeniem go w magazynie:
 - ◆ urządzenia dokonujące pomiaru parametrów gazu i jego składu dla potrzeb rozliczeń,
 - ◆ filtry i separatory usuwające wodę i zanieczyszczenia z gazu,
 - ◆ sprężarki i chłodnice,
- ◆ urządzenia podziemne (kawerny i studnie doprowadzające gaz do i z kawerny),
- ◆ urządzenia naziemne przetwarzające gaz po wydobyciu go z magazynu:
 - ◆ urządzenia usuwające wodę (także parę wodną) i zanieczyszczenia stałe z gazu,
 - ◆ sprężarki i chłodnice lub podgrzewacze i zawory redukcyjne (w zależności od relacji ciśnienia na wyjściu ze studni kawerny do ciśnienia w gazociągu),
 - ◆ urządzenia dokonujące pomiaru parametrów gazu i jego składu dla potrzeb rozliczeń.

Struktura połączeń między urządzeniami podczas napełniania magazynu przedstawiona jest na rysunku 1.

Przyjęto, że magazyn podłączony jest do dwóch gazociągów G_1 i G_2 . Na początku gaz przepływa przez urządzenia pomiarowe P_1 i P_2 . Następnie poprzez macierz zaworów MZ_1 trafia do sprężarek C_1-C_N . Macierz zaworów MZ_1 umożliwia podłączenie każdego z gazociągów do każdej ze sprężarek. Przed sprężarkami znajdują się filtry i separatory F_1-F_N . W niektórych magazynach znajdują się one przed zaworami MZ_1 . Położenie tych filtrów nie ma jednak większe-



Rys. 1. Schemat połączeń urządzeń przy napełnianiu magazynu

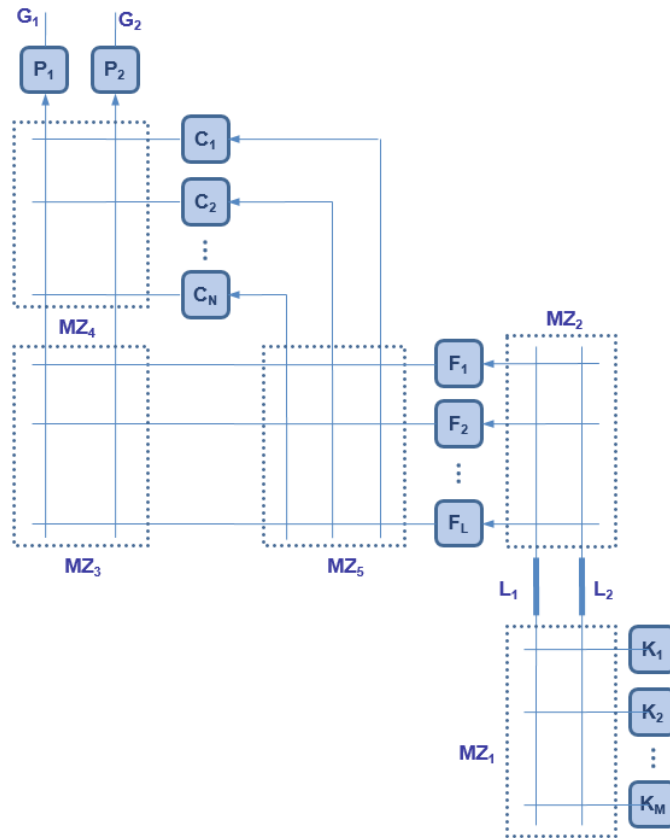
Fig. 1. Devices connections scheme in injection mode

go znaczenia, gdyż nie stanowią one ograniczenia przepływu, a spadek ciśnienia spowodowany przez nie jest taki sam, niezależnie od lokalizacji. Po sprężeniu gaz przesyłany jest do kawern K_1 - K_M . Fizyczne położenie kawern zdeterminowane jest lokalizacją odpowiednich struktur geologicznych, stąd czasem między zespołami kawern są spore odległości. Z tego powodu nie można pominąć spadków ciśnienia w kolektorach łączących sprężarki z kawernami (oznaczonych tu L_1 i L_2). Macierz zaworów MZ_2 określa która sprężarka włącza gaz do którego kolektora, a macierz MZ_3 – z którego kolektora gaz wędruje do której kawerny.

Dla niektórych magazynów ciśnienie uzyskane z pojedynczego stopnia sprężarek odśrodkowych jest zbyt małe. Wówczas stosowane są albo sprężarki dwusekcyjne, dające wyższe ciśnienie wyjściowe, ale kosztem przepływu albo drugi stopień sprężania – dodatkowy zestaw sprężarek połączony szeregowo ze stopniem pierwszym (tzw. kaskada).

Połączenia urządzeń podczas opróżniania magazynu gazu przedstawia rysunek 2.

Z kawern K_1 - K_M gaz trafia poprzez zawory MZ_1 , kolektory przesyłowe L_1 i L_2 , zawory MZ_2 do filtrów F_1 - F_L . Mają one za zadanie usunąć cząstki stałe (materiał skalny), osuszyć gaz (w gazociągu obowiązują silne ograniczenia na zawartość pary wodnej) i ewentualnie zredukować ciśnienie. Następnie poprzez zawory MZ_3 gaz wędruje do urządzeń pomiarowych i do gazociągu. Jeśli ciśnienie w kawernach jest niewielkie, to potrzebna jest nie redukcja ciśnienia, ale sprężenie. Wówczas gaz zamiast do zaworów MZ_3 , poprzez zawory MZ_4 trafia do sprężarek C_1 - C_N . Ze sprężarek poprzez zawory MZ_5 gaz trafia do urządzeń pomiarowych.



Rys. 2. Schemat połączeń urządzeń przy opróżnianiu magazynu

Fig. 2. Devices connections scheme in withdrawal mode

Opracowano i opisano algorytmy pozwalające na modelowanie zachowania poszczególnych typów urządzeń infrastruktury nadziemnej biorących udział w procesie magazynowania gazu w tym: filtro-separatory, osuszacze glikolowe, stacje pomiaru ilości gazu, sprężarki, podgrzewacze, chłodnice, zawory dławiące, system dystrybucji.

2.3. Algorytmy optymalizacji pracy magazynu

2.3.1. Zadanie optymalizacji

Zadanie optymalizacji realizowane jest na pewnym horyzoncie czasowym. Jest on zwykle ograniczony do 1–2 dni ze względu na dostępność danych wejściowych oraz charakter usług magazynowych realizowanych na rzecz klientów magazynu.

By zaplanować pracę magazynu gazu należy określić:

- ◆ kierunek przepływu gazu (napełnianie magazynu czy opróżnianie) dla każdego z podłączonych gazociągów,
- ◆ wolumen przepływu gazu przy każdym połączeniu do gazociągu,
- ◆ rozdział przepływającego gazu między kawerny,
- ◆ rozdział gazu między sprężarki.

Kierunek przepływu gazu i wolumen przepływu dogodnie jest rozpatrywać łącznie jako liczbę dodatnią lub ujemną, gdzie znak mówi o kierunku przepływu. Podczas optymalizacji pracy magazynu zmienne te traktuje się jako dane, gdyż wynikają one bezpośrednio z zatwierdzonych nominacji klientów magazynu.

Zadanie optymalizacji można zdekomponować na następujące podzadania:

- ◆ wybór używanych kawern i rozdział przepływu na używane kawerny,
- ◆ określenie połączeń kawern do kolektorów przesyłowych,
- ◆ określenie połączeń sprężarek do gazociągów oraz kolektorów,
- ◆ optymalizację pracy baterii podłączonych równolegle sprężarek (lub kaskady dwóch baterii sprężarek jeżeli konfiguracja magazynu to umożliwi).

2.3.2. Rozdział przepływu na kawerny

Rozdział przepływu na kawerny wymaga uwzględnienia następujących ograniczeń:

- ◆ maksymalne i minimalne ciśnienie w kawernie oraz odpowiadająca mu maksymalna i minimalna ilość gazu w kawernie,
- ◆ maksymalny przepływ podczas napełniania i opróżniania kawerny,
- ◆ wyrównane ciśnienia w kawernach podłączonych do jednego kolektora – ciśnienia można co prawda korygować za pomocą zaworów redukcyjnych zainstalowanych przy kawernach, jednak ze względu na obniżenie temperatury gazu podczas rozprężania, może wystąpić skroplenie i zamarzanie pary wodnej zawartej w gazie.

Proponuje się wykorzystanie następującej heurystyki pozwalającej na rozdzielenie przepływu na kawerny. Podczas napełniania magazynu, w kolejnych godzinach kawernom posortowanym w kolejności rosnącego ciśnienia przydzielony zostanie ich przepływ maksymalny, do wyczerpania się przepływu (do momentu gdy przydzielony kawernom w danej godzinie przepływ osiągnie wartość zatwierdzonych nominacji klientów) lub do momentu gdy kawerna osiągnie maksymalne ciśnienie. Podczas opróżniania magazynu stosowany będzie analogiczny algorytm, jedynie kolejność sortowania będzie odwrotna i rozpatrywane będzie minimalne ciśnienie w kawernie zamiast maksymalnego.

Powyższe podejście ma następujące zalety:

- ◆ redukuje rozbieżność ciśnień między kawernami, umożliwiając swobodny podział przepływu między kolektory,
- ◆ utrzymuje najwyższe ciśnienie w kawernach na minimalnym poziomie, zmniejszając pracę sprężarek podczas napełniania magazynu,
- ◆ opróżniane są w pierwszej kolejności kawerny o najwyższym ciśnieniu czyli początkowo koszt pracy sprężarek będzie niewielki. Potem wprawdzie wzrośnie, ale dalsza przyszłość

(po zakończeniu horyzontu) jest mniej pewna, więc prawdopodobieństwo poniesienia tych kosztów też jest mniejsze.

2.3.3. Przyporządkowanie kawern do kolektorów przesyłowych

Po określeniu przepływów dla poszczególnych kawern można określić najkorzystniejszy sposób połączenia kawern do kolektorów wg następującej heurystyki. Algorytm sprawdza kolejno różne przypadki podziału, zaczynając od jednej kawerny (o najmniejszym ciśnieniu) do kolektora 1, a pozostałych kawern do kolektora 2. W kolejnych przypadkach przekłada za każdym razem jedną kawernę, o najniższym ciśnieniu z kolektora 2 do kolektora 1, aż zostanie tylko jedna kawerna w kolektorze 2. Dla każdego przypadku obliczane są przepływy do poszczególnych kolektorów, ciśnienia w kolektorze oraz spadki ciśnień na innych urządzeniach naziemnych podłączonych między sprężarkami a kolektorami. W ten sposób możliwe jest wyznaczenie ciśnienia na sprężarkach i oszacowanie łącznej pracy jaką muszą wykonać sprężarki przy sprężaniu izentropowym. Algorytm wybiera taki przypadek, który da najmniejszą spodziewaną pracę.

2.3.4. Przyporządkowanie sprężarek do gazociągów i kolektorów przesyłowych

Kolejne zagadnienie to przydzielenie poszczególnych sprężarek do odpowiednich gazociągów i kolektorów. Często jest ono zdefiniowane przez politykę zarządzania magazynem gazu, która zakłada przykładowo, że wybrana sprężarka jest normalnie podłączona do konkretnego gazociągu, a do innego może być podłączana tylko w wyjątkowych przypadkach. W takim przypadku w procesie przydziału sprężarek do gazociągów i kolektorów algorytm zakłada wykorzystanie listy dopuszczalnych połączeń, które grupowane są na podstawie priorytetów wynikłych z polityki magazynu. Przy porównywaniu pozycji z listy pomiędzy grupami, za korzystniejszą uznaje się pozycję z grupy o wyższym priorytecie. Dla pozycji w tej samej grupie ważny jest rezultat ekonomiczny. Grupa o niższym priorytecie będzie analizowana dopiero wtedy, gdy w grupach o wyższym priorytecie żadnej pozycji nie da się zrealizować. Algorytm zakłada, iż na horyzoncie optymalizacji nie będzie zmian podłączenia sprężarek między gazociągami czy kolektorami.

2.3.5. Optymalizacja pracy baterii sprężarek

Po przydzieleniu każdej sprężarce źródła gazu i celu, zagadnienie optymalizacji kosztów pracy magazynu gazu podłączonego do kilku gazociągów lub posiadającego kilka kolektorów rozbija się na kilka prostszych i niezależnych zadań optymalizacji. Zadania te będą niezależne, gdyż rozwiązanie jednego z zadań w żaden sposób nie wpływa na inne z zadań. W każdym zadaniu optymalizacji podlega albo bateria równolegle połączonych sprężarek albo dwie baterie sprężarek połączonych równolegle, przy czym baterie są połączone w kaskadę.

2.3.5.1. Pojedyncza bateria sprężarek

Przed rozwiązaniem zadania dla baterii sprężarek należy policzyć ciśnienie ssania i tłoczenia dla baterii. Można to zrobić modyfikując ciśnienie w gazociągu o spadek ciśnienia na urządzeniach między gazociągiem, a sprężarkami. Spadek ciśnienia obliczany jest na podstawie natężenia przepływu gazu. Analogicznie po stronie kawern – ciśnienie w kolektorze modyfikowane jest o spadek ciśnienia na filtrach lub stacjach glikolowych, obliczony na podstawie przepływu.

Algorytm optymalizacji pracy baterii sprężarek połączonych równolegle jest najtrudniejszy z dotychczas omawianych pod względem obliczeniowym. Zawiera on trzy części:

- ◆ wyznaczenie kosztu pracy sprężarki w zależności od przepływu gazu dla każdego z trybów, w którym sprężarka może pracować w danych warunkach (ciśnienie ssania, ciśnienie tłoczenia, temperatura ssania, skład gazu),
- ◆ optymalizacja podziału strumienia gazu między sprężarki dla każdego możliwego zestawu trybów wszystkich sprężarek w baterii,
- ◆ dobór trybów pracy sprężarek na horyzoncie optymalizacji.
Wyznaczenie kosztu pracy sprężarki składa się z dwóch etapów:
- ◆ wyznaczenie minimalnego i maksymalnego przepływu gazu (zakresu przepływu bez używania przepływu zwrotnego – *recycle mode*),
- ◆ podział zakresu na szereg punktów i dla każdego punktu (przepływu) wyznaczenie kosztu paliwa.

Obliczenia, jakie należy tu wykonać zależą od typu sprężarki. Algorytm optymalizacji wspiera sprężarki tłokowe, odśrodkowe jednosekcyjne oraz odśrodkowe dwusekcyjne z chłodzeniem i bez chłodzenia międzysekcyjnego. Każda sprężarka może być napędzana silnikiem elektrycznym albo turbiną gazową. Transition Technologies opracowało szereg procedur liczących poszczególne przypadki (Wojdan i in. 2017). Koszt wyznaczany jest dla każdej godziny horyzontu optymalizacji, dla każdej sprężarki i dla każdego trybu pracy. Przy rozwiązywaniu układu równań nieliniowych wykorzystano procedurę HYBRD1 z biblioteki MINPACK (Moré i in. 1980). W obliczeniach wymagane jest wykorzystanie modułu obliczeń termodynamicznych działający w oparciu model gazu opisany w raporcie AGA8 (Starling i Savidge 1992). Ze względu na zakres ciśnień pozwala on znacznie ograniczyć błąd obliczeń w stosunku do modelu gazu idealnego.

Znając funkcje kosztu paliwa każdej ze sprężarek, można dokonać optymalizacji rozłożenia gazu między sprężarki. Wynik optymalizacji zależy od trybu pracy każdej ze sprężarek, więc optymalizację należy wykonać dla każdej godziny horyzontu optymalizacji i dla każdej kombinacji trybów sprężarek. Do optymalizacji wykorzystano metodę SQP, gdyż w naturalny sposób uwzględnia ona ograniczenia równościowe (suma przepływów przez wszystkie sprężarki jest zadana) oraz nierównościowe (dopuszczalny obszar pracy sprężarki).

Wyboru trybów pracy sprężarek nie można dokonać niezależnie dla kolejnych godzin, gdyż ze zmianą trybu pracy, załączeniem lub uruchomieniem urządzenia związane są pewne dodatkowe koszty (reprezentujące stracony gaz, dodatkową pracę ludzi, skrócenie żywotności urządzeń, skrócenie okresów między serwisami itp.) jak również nie wszystkie tryby pracy sprężarki mogą

po sobie bezpośrednio następować (np. do przełączenia sprężarki dwusekcyjnej z trybu równoległego w tryb szeregowy niezbędne jest jej zatrzymanie).

Wyboru trybów dokonano używając programowania dynamicznego. Sterowaniem są decyzje o kombinacjach trybów sprężarek. Stanem są wartości sterowań w poprzedniej godzinie (dzięki temu można uwzględnić koszty uruchamiania/zatrzymania czy zmiany stanu). Etapowym kosztem jest suma trzech składników: kosztu paliwa (zależy od sterowania), kosztu zmiany stanu (zależy od sterowania i stanu) i kosztu serwisowania (zależy od sterowania).

2.3.5.2. Kaskada dwóch baterii sprężarek

Przy rozpatrywaniu zadania optymalizacji pracy kaskady dwóch baterii sprężarek główną trudność stanowi nieznaną ciśnień i temperatury gazu między bateriami. Gdybyśmy były one znane, zadanie rozpadłoby się na dwa niezależne zadania optymalizacji, każde dotyczące jednej baterii.

By rozwiązać zadania dla kaskady baterii, pomiędzy zadanie optymalizacji rozłożenia przepływu na sprężarki, a zadanie doboru najlepszych trybów sprężarek dodawana jest jeszcze jedna warstwa – zadanie optymalizacji ciśnienia między bateriami. W ten sposób otrzymamy następujący algorytm postępowania:

1. Dla każdej godziny i dla każdego zestawu trybów wszystkich sprężarek (z obu baterii) znajdź ciśnienie między bateriami, przy którym koszty paliwa będą minimalne. Ciśnienie to będzie poszukiwane metodą Brenta wykorzystującą interpolację funkcją paraboliczną w trzech punktach (Press i in. 1992). Podczas działania metody wymagane jest obliczanie wartości minimalizowanej funkcji dla różnych ciśnień pomiędzy bateriami. Jest to wykonywane poprzez iteracyjne rozwiązywanie zadania optymalizacji pojedynczej baterii najpierw dla sprężarek pierwszego stopnia, a potem drugiego.
2. Przy pomocy programowania dynamicznego znajdź najlepsze tryby pracy sprężarek w poszczególnych godzinach. Ten etap w zasadzie nie odbiega od przypadku bez kaskady (jedynie sprężarek jest więcej).

Podsumowanie

Dotychczasowe produkty Transition Technologies S.A. realizujące zadania symulacji i optymalizacji pracy podziemnych magazynów gazu realizowały niezależnie zadania optymalizacji pracy sprężarek od symulacji części naziemnej i podziemnej magazynu. Takie podejście mogło prowadzić do otrzymywania rozwiązań suboptymalnych. W proponowanym podejściu rozwiązywane jest jedno, kompleksowe i wieloetapowe zadanie optymalizacji dla całego magazynu gazu, uwzględniające wszystkie kluczowe elementy infrastruktury nadziemnej i podziemnej magazynu. Podejście to jest oparte na uogólnionym modelu magazynu gazu, opracowanym po

przeanalizowaniu wielu typowych struktur podziemnych magazynów gazu, zidentyfikowanych na podstawie dotychczasowych doświadczeń Transition Technologies S.A. Dzięki temu opracowane algorytmy mają duży potencjał implementacyjny.

Wynik realizacji przeprowadzonych prac rozwojowych w opinii Transition Technologies S.A. może stanowić solidną podstawę do stworzenia unikalnego na skalę światową produktu IT kompleksowo wspierającego operatorów podziemnych magazynów gazu w realizacji procesów obsługi magazynów w sposób bezpieczny i optymalny pod względem ekonomicznym.

Literatura

- WOJDAN i in. 2017 – WOJDAN, K., RUSZCZYCKI, B., ŚWIRSKI, K., WARCHOL, M. 2017. The Method for Optimisation of Gas Compressors Performance in Gas Storage Systems. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology* 1, 1, 10.1504/IJOGCT.2017.10006328.
- WOJDAN i in. 2014 – WOJDAN, K., RUSZCZYCKI, B., MICHALK, D. i SWIRSKI, K. 2014. Method for simulation and optimization of underground gas storage performance. *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles* vol. 69, n o. 7.
- STARLING, K.E. i SAVIDGE, J.L. 1992. Compressibility Factors for Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases, American Gas Association (AGA) Transmission Measurement Committee Report No. 8, American Petroleum Institute (API) MPMS, chapter 14.2, second edition, November 1992.
- MORÉ i in. 1980 – MORÉ, J.J., GARBOW, B.S. i HILLSTROM, K.E. 1980. User Guide for MINPACK-1, Argonne National Laboratory report ANL-80-74.
- PRESS i in. 1992 – PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T. i FLANNERY, B.P. 1992. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing (second edition), Cambridge University Press.

Michał WARCHOŁ, Mirosław DYRDA

Integrated optimization system of underground gas storages operation

Abstract

This document describes the implementation concept of the optimization system of underground gas storage operation. The algorithms developed by Transition Technologies and described in the document allow consideration in one, multi-stage optimization task the entire gas storage infrastructure (caverns and aboveground installation, including compressors). The goal is to determine the optimal set of operating

devices, connections between them, and gas flow, which minimizes operational costs of the gas storage. Algorithms have been developed for a generalized gas storage structure, which allows their application for optimizing the work of storages of different structures. Among others, the structure including two batteries of compressors connected in series, resulting in significant increase in computational difficulty was considered. A number of modern algorithms and computational procedures have been used to obtain high precision of calculations, as well as acceptable speed. The solution therefore can be utilized for efficient, short-term planning of gas storage operation, supporting the storage technical operator in their day-to-day duties and providing energy consumption savings.

KEYWORDS: natural gas, underground gas storage, optimization, software, compressor, cavern, planning, costs minimization