AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

KATEDRA ELEKTRONIKI

Prof. dr hab. inż. Mariusz Ziółko
tel. +48 12 617 3048, e-mail: ziolko@agh.edu.pl, www.dsp.agh.edu.pl

Kraków, dn. 27 kwietnia 2018

Ocena rozprawy doktorskiej pt.
„Modelowanie nieustalonego przepływu gazu o zmiennym składzie w rurociągu"
mgr inż. Pawła Zarodkiewicza

1. OGÓLNY KOMENTARZ

Temat doktoratu bardzo dobrze charakteryzuje główną tezę rozprawy. Do rozwijanej od kilkudziesięciu lat problematyki modelowania przepływów w gazociągach, Doktorant dodał aspekt uwzględnienia składu gazu. Umożliwia to modelowanie przepływów energii, czyli czynnika którym odbiorca jest najbardziej zainteresowany. Rozprawa doktorska prezentuje wyniki badań naukowych, ale przy okazji wychodzi naprzeciw potrzebom rynku. Rozliczenia z odbiorcami gazu powinny bowiem dotyczyć nie ilości zużytego gazu a rozmiarów dostarczonej energii. Przykładowo, odbiorcy komunalni są obecnie rozliczani w jednostkach energetycznych (tzn. kWh), ale w praktyce pomiary są objętościowe i zakłada się stałe wartości ciepła spalania dla trzech rodzajów gazu: wysokometanowego grupy E, zaazotowanego podgrupy Ls i zaazotowany podgrupy Lw. Wraz z rosnącym zróżnicowaniem dostawców, skład gazu ulega jednak coraz większym wahaniom. Oznacza to, że coraz większe występują odchyłki w liniowej zależności między objętością gazu a jego energią cieplną. Zatem tematyka rozprawy doktorskiej jest nie tylko wartościowa z naukowego punktu widzenia, ale również bardzo aktualna dla energetyki.

Praca jest dobrze zredagowana i dzięki temu łatwo się ją czyta. Na wstępie rozprawy przedstawiony jest europejski rynek gazu. Jest to ciekawa prezentacja, szczególnie ze względu na duże znaczenie gazu dla światowej energetyki, nie są to jednak informacje o charakterze naukowym. Praca nabiera charakteru naukowego od strony 30, czyli od prezentacji celu i tezy rozprawy doktorskiej. Głównym celem rozprawy jest wykazanie, że modelowanie przepływu gazu w jednostkach strumienia energii ma zalety w porównaniu z powszechnie stosowanym opisem przepływu w postaci objętości lub masy gazu. Główną tezą rozprawy jest stwierdzenie, że modelowanie strumienia energii chemicznej gazu, zamiast strumienia objętości, pozwoli zwiększyć dokładność symulacji przepływów i usprawni prowadzenie ruchu systemu przesyłowego gazu.

Od wielu lat pojawiają się publikacje z prezentacjami coraz bardziej skomplikowanych modeli matematycznych przepływu gazu w rurociągach. Od strony fizycznej występujące tam zjawiska są bardzo precyzyjnie zbadane i zamodelowane. Nic dziwnego zatem, że modele te przenikają do publikacji o tematyce inżynierskiej. Do modelowania przepływu gazu, mgr inż. Paweł Zarodkiewicz używa skomplikowanego układu trzech równań różniczkowych cząstkowych typu hiperbolicznego. Model jest bardzo precyzyjny bo uwzględnia różnorodne zjawiska fizyczne, w tym również takie, które moim zdaniem mają drugorzędne znaczenie dla praktyki inżynierskiej. Wydaje się, że nie wszystkie możliwości tego modelu mają praktyczne znaczenie a jego złożoność sprawia sporo kłopotów. Równania modelują procesy przebiegające z prędkością fal dźwiękowych. Wymaga to drobnej dyskretyzacji względem czasu, czyli czasochłonnych obliczeń komputerowych. Jak zrozumiałem, mgr inż. Paweł Zarodkiewicz posługuje się grubszą dyskretyzacją. Spodziewam się, że to degraduje pewne możliwości modelu matematycznego. Do ostatecznej weryfikacji przyjętego modelu gazociągów, mgr inż. Paweł Zarodkiewicz wykorzystuje przykłady modelowania obiektu rzeczywistego.

2. GŁÓWNE OSIĄGNIĘCIA

Mgr inż. Paweł Zarodkiewicz przedstawił modelowanie przepływów w gazociągach dla warunków zmiennego składu gazu dostarczanego do sieci. Wykazał się przy tym dobrą znajomością zjawisk fizycznych i modeli matematycznych dla jednowymiarowego przepływu gazów w rurociągach. Wspierając się doniesieniami literaturowymi, sformułował model matematyczny nieustalonego przepływu gazu, w którym zmienną zależną od czasu i położenia w gazociągu jest strumień energii. Doktorant przeanalizował numeryczne metody umożliwiające posługiwanie się stworzonym modelem matematycznym i wybrał jego zdaniem metodę najefektywniejszą. Dzięki temu otrzymał aproksymacje rozwiązań dla równań różniczkowych cząstkowych z zadanymi warunkami granicznymi. Doktorant wykazał się dobrą znajomością procedur obliczeniowych, które umożliwiają komputerowe śledzenie zmian jakości gazu transportowanego rurociągiem. Wyniki tych prac mgr inż. Paweł Zarodkiewicz przetestował na gazociągu Gustorzyn-Mogilno mającym średnicę 70 cm i długość 81,5 km.

Interesujące jest też studium symulacji procesu zatłaczania wodoru do sieci gazociągów. Problem wodoru będącego nośnikiem energii jest nowatorskim zagadnieniem i zapewne w przyszłości będzie miał znacznie większe znaczenie gospodarcze.

3. UWAGI KRYTYCZNE

Mgr inż. Paweł Zarodkiewicz ulega magii skomplikowanych modeli matematycznych, uwzględniających nawet mało istotne zjawiska fizyczne. Przykładowo, problematyka „transportu i dyfuzji wodoru w ściance rurociągu" oraz „rozpuszczalności wodoru w metalu" wspomniana na str. 46, jest tak bardzo marginalna, że można ją całkowicie pominąć. Doktorant potwierdza to na stronie 49.

Byłbym zadowolony gdyby w rozprawie były przestawione modele matematyczne uwzględniające tylko zjawiska fizyczne mające istotny wpływ na modelowaną

rzeczywistość. Posługiwanie się uproszczonymi modelami byłoby znacznie bardziej efektywne w praktyce inżynierskiej.

W pracy są usterki, głównie natury redakcyjnej:

1. Trudno pogodzić się ze zdaniem ze str. 30, że biogaz „charakteryzuje się składem podobnym do gazu ziemnego, jednak o obniżonej kaloryczności (ok. 60%)".
2. Trudno się domyślić co oznaczają pierwsze dwa człony z lewej strony równania (5.6).
3. Wektory A, B i C równania (5.7) wskazują na klasyczne zainteresowanie przepływem objętościowym i ciśnieniem gazu a nie transferem energii cieplnej gazu. Podobnie dla równania (5.10).
4. Wydaje się, że mianownik ostatniego członu (5.8) powinien być równy 2 a nie 4 i podobnie dla wzoru (5.9) powinno być 1 zamiast 2.
5. Co oznacza, że metoda cechuje się „wyższą stabilnością" na str. 59 lub jest „bardziej stabilna" na str. 60.
6. Dla metody Rungego-Kutty nie ma „rozwiązywania równań" (5.11) tylko sukcesywnie oblicza się współczynniki z lewej strony. Jest to metoda numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych. Zapewne trzeba najpierw równania różniczkowe cząstkowe aproksymować układem równań różniczkowych zwyczajnych.
7. Kontrowersyjne jest oznaczanie zmiennej przestrzennej w równaniach (5.15)-(5.17). Po lewej stronie jest ona oznaczana jako indeks j a powinno być x_j, bo przecież Y jest funkcją różniczkowalną zarówno względem zmiennej przestrzennej x jak i czasu t.
8. Po lewej stronie równania (5.15) dyskretna zmienna przestrzenna jest oznaczana przez j a po prawej stronie przez i. Rys. 9 nie jest wyjaśnieniem, można tam wyczytać, że $j=i$.
9. W spisie literatury brakuje pozycji (Lele, 1992) na którą Doktorant powołuje się przed wzorem (5.19).
10. Model matematyczny został zaczerpnięty z literatury, głównie z publikacji Promotora. Komputerowa implementacja modelu matematycznego była zapewne istotną częścią pracy Doktoranta. Dlatego sadzę, że prezentacja wykorzystanych procedur numerycznych powinna być bardziej precyzyjnie przedstawiona. Niestety tak nie jest i dlatego pojawia się wiele pytań związanych z komputerowym modelowaniem gazociągu. Przykładowo nie jest jasna użyteczność formuł (5.19) – (5.22), powtórnie zapisanych w postaci macierzowej (5.23). Czy po prawych stronach nie powinny być dopisane rzędy błędów? Trzeba się domyślać, że pochodne po lewych stronach równań są brane w odpowiednich punktach.
11. Zmienne dyskretne we worach (5.12)-(5.17) są oznaczane dużymi literami Y a we worach (5.8)-(5.25) literami małymi y. Skąd ta różnica?
12. Rys.11 wskazuje, że zmiana składu mieszaniny gazów potrzebuje ponad 16 godz. na przemieszczenie się z początku na koniec gazociągu. Fala dźwiękowa potrzebuje zaledwie 3 minut. To oznacza, że równania falowe chyba nie są właściwym modelem. Podpis pod rysunkiem sugeruje, że przedstawione są „poprawne wartości". Jednak identyczne kształty zmian udziałów molowych nie są możliwe. Na końcu gazociągu musi być widoczny efekt rozmycia, czyli dyfuzji.
13. Podobnie Rys.18 c prezentuje udział molowy etanu na wejściu i wyjściu gazociągu. Przebiegi są tylko przesunięte w czasie bo takie rozwiązania daje jednorodne równanie

transportu. Nie ma to jednak nic wspólnego z rzeczywistymi przebiegami, co autor potwierdza dopisując słowa „na potrzeby walidacji modelu". Może zatem powinien być inny model, np. uwzględniający dyfuzję cząstek etanu w płynącym gazie?
14. Na dole strony 77 sugerowany jest 5-minutowy czas dyskretyzacji po czasie. Jest to typowe w systemach dyspozytorskich, ale do modelowania zjawisk falowych taki czas jest zdecydowanie za długi. W ciągu 5 minut dla rozpatrywanego 81,5 km gazociągu, fale dźwiękowe przebiegną cały gazociąg tam i z powrotem.
15. Rys.21 i Rys.23 sugerują, że ciśnienia gazu w punkcie wejścia i wyjścia są prawie identyczne. Podobnie strumienie energii na wejściu i wyjściu. Przebiegi ciepła spalania na wejściu i wyjściu są też prawie identyczne. Są tylko przesunięte w czasie, co jest wynikiem opóźnienia wnoszonego przez równanie transportu masy. Brak „rozmycia" jest niepokojący. Jest to bardzo dziwne. Tylko temperatury się różnią. Podobnie porównując w kolejnym przykładzie Rys.25 i Rys.27 niezrozumiałe są jednakowe przebiegi ciśnień i strumieni energii na wejściu i wyjściu rurociągów.

4. KOŃCOWA OCENA.

Wystawienie oceny końcowej jest utrudnione przez fakt, że główna część rozprawy doktorskiej została przez Promotora wespół z Doktorantem opublikowana w 2017 roku w języku angielskim (Maciej Chaczykowski, Paweł Zarodkiewicz: Symulation of natural gas quality distribution for pipeline systems. Energy, 134 (2017) 681-698). Prof. Maciej Chaczykowski jest wymieniowy na pierwszym miejscu i dodatkowo opublikował w roku 2010 pracę zatytułowaną „Transient flow in natural gas pipeline – The effect of pipeline thermal model", gdzie przedstawił zasadniczą część modelu matematycznego zacytowanego przez Doktoranta. Jaki zatem jest wkład pracy Doktoranta? Dowiedziałem się od prof. Macieja Chaczykowskiego, że mgr inż. Paweł Zarodkiewicz ma dominujący udział w osiągnięciach przedstawionych w recenzowanej przeze mnie rozprawie doktorskiej.

Zatem stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Pawła Zarodkiewicza spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnioskuję o dopuszczenie pracy mgr inż. Pawła Zarodkiewicza zatytułowanej „Modelowanie nieustalonego przepływu gazu o zmiennym składzie w rurociągu" do publicznej obrony.

Marian Zieja