

GRZEGORZ ZELEK¹WYKORZYSTANIE METODY SPLOTU W SYMULACJACH
PULSACJI CIŚNIENIA GAZU W INSTALACJACH
SPRĘŻAREK WYPOROWYCHCONVOLUTION METHOD IN SIMULATIONS OF
PULSATIONS IN VOLUMETRIC COMPRESSOR
MANIFOLDS

Streszczenie

Niniejszy artykuł dotyczy zagadnienia nieustalonych zjawisk przepływowych jakie zachodzą w instalacjach sprężarek wyporowych. Opisano historyczny rozwój metod ich modelowania, omówiono założenia najczęściej stosowanych podejść symulacyjnych, zaprezentowano również koncepcję metody wykorzystującą operację splotu. W metodzie tej fragment bądź całą analizowaną instalację traktuje się jak element typu czarna skrzynka. Jak pokazano zidentyfikowane właściwości takiego obiektu można z dobrym skutkiem wprowadzić poprzez operację splotu do czasoprzestrzennych symulacji zredukowanych.

Słowa kluczowe: sprężarki objętościowe, pulsacje, splot, symulacje

Abstract

Process installations quite often contain components actively exciting pulsating flow inside. These might be for instance volumetric pumps or compressors. In general pulsations are unfavorable effects that potentially may cause structural problems with the manifold or may affect production in the process installation. Hence methods of control and prediction of that effects are highly appreciated especially. The following paper is focused on a concept of a simulation method that can be seen as time-domain analogy of frequency domain four pole transfer matrix method. Its advantage lies in the fact that part of the installation might be treated as black-box element. Once identification of such object is done it can be multiply used in an efficient manner in time-domain simulations of entire installation.

Keywords: compressors, pulsations, convolution, simulations

¹ Dr inż. Grzegorz Zelek, Politechnika Krakowska.

1. Wprowadzenie

Jednym z ubocznych skutków pracy sprężarek wyporowych jest generowanie pewnego poziomu pulsacji ciśnienia gazu w przyłączonej instalacji. Poziom ten w złożony sposób zależy od parametrów sprężarki, geometrii instalacji, właściwości gazu i parametrów punktu pracy. Występowanie tego zjawiska może prowadzić do rozmaitych niepożądanych konsekwencji związanych np. z obniżoną trwałością zaworów sprężarkowych, problemów z nadmierną emisją hałasu, wibracjami itd. W tym kontekście narzędzia symulacyjne pozwalające przewidywać zjawiska pulsacyjnego przepływu gazu okazują się być bardzo pomocne.

Pierwsze symulacje zjawisk pulsacyjnych prowadzone były od lat 50-tych XX wieku. Zapotrzebowanie ze strony przemysłu gazowniczego w USA było impulsem do skonstruowania analogowej maszyny umożliwiającej symulowanie zjawisk falowych w oparciu o analogię elektro-akustyczną. W podejściu tym model rzeczywistej instalacji odwzorowuje się poprzez stosowną kompozycję elementów elektrycznych takich jak oporniki, cewki, kondensatory a rejestrowane zmiany napięcia i natężenia prądu interpretuje jako pulsacje ciśnienia i wydatku masowego [6].

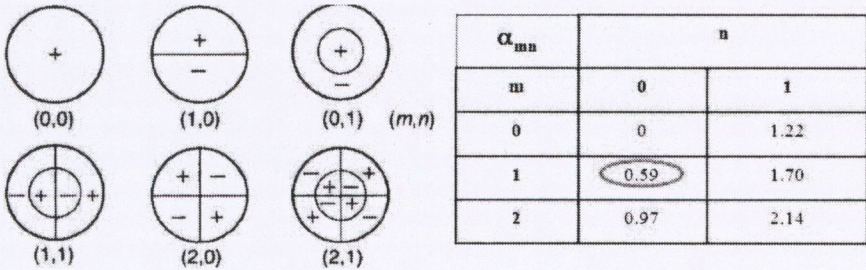
Rozwój techniki mikroprocesorowej, języków programowania i metod numerycznych sprawił, że począwszy od lat 70 i 80 XX wieku bardziej wydajne stało się budowanie modeli instalacji w pamięci komputera cyfrowego i rozwiązywanie rządzących równań różniczkowych poprzez ich numeryczne całkowanie a nie elektryczne analogie. Metody rozwinięte w początkowym okresie wychodziły z postaci jednowymiarowego równania falowego, przy czym w ośrodkach amerykańskich bardziej popularne były metody rozwiązywania w dziedzinie amplitudowo-częstotliwościowej, w europejskich z kolei w dziedzinie czasu. W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zainteresowania rozwiązaniami w przestrzeni czasu [1] ale opierających się nie tyle na równaniu falowym, co na bardziej podstawowych zależnościach takich jak: bilans masy, pędu i energii.

W sposób ogólny ruch gazu można opisać kompletem równań bilansowych, wyrażających zasady zachowania masy, pędu (równaniami Naviera-Stokesa) oraz energii. Dla takiego zestawu zależności problem znalezienia analitycznego rozwiązania, czy choćby tylko podania warunków jego istnienia jest znany [5] i ogłoszony przez Matematyczny Instytut Claya jako jeden z problemów milenijnych. Stąd typowym podejściem w mechanice płynów jest wykorzystywanie akceptowalnych założeń upraszczających, co ułatwiających znajdowanie rozwiązań dla danej klasy problemów [8].

W przypadku zagadnień pulsacji w instalacjach sprężarkowych powszechnie stosowanym uproszczeniem jest redukcja wymiaru zagadnienia z 3D do 1D. Przepływ odbywa się wewnątrz przestrzennych kanałów – najczęściej rur, gdzie wymiary poprzeczne są wyraźnie zdominowane przez wymiar wzdłużny. Oznacza to zatem zawężenie się do fal płaskich propagujących wewnątrz instalacji. Z teorii akustyki wiadomo, że występowanie modów na przekroju kanału jest związane z prędkością rozchodzenia się fali dźwiękowej i wymiarami poprzecznymi [4]. Dla przekroju kołowego sytuacja kształtuje się w sposób przedstawiony wzorem (1) i na Rys. 1. Na potrzeby wyznaczenia przebiegów pulsacyjnych dalsze możliwe i często stosowane uproszczenia to traktowanie gazu jako płynu nielepkiego, nieprzewodzącego ciepła oraz zaniedbanie wymiany ciepła z otoczeniem, co prowadzi do postaci równań (2) (3) (4). Jeśli przyjąć, że prędkość przepływu jest mała w porównaniu do prędkości dźwięku oraz, że kanał ma stały przekrój lub innymi słowy

założyć, że jego zmiana odbywa się na dystansie małym w porównaniu do długości fali skutkuje to powszechnie znanym równaniem falowym (5).

$$f_{cut-off} = \alpha_{mn} \cdot \frac{c}{d} \quad (1)$$



Rys. 1. Akustyczne mody poprzeczne dla kanału o przekroju kołowym

Fig. 1. Acoustic transversal modes for a circular cross-section duct

$$\frac{\partial(\rho \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w^2 + p \cdot A)}{\partial x} = p \cdot \frac{dA}{dx} \quad (3)$$

$$p \cdot \rho^{-k} = \text{idem} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

W połączeniu z odpowiednimi warunkami brzegowymi opisanymi szerzej w [12] zagadnienie to można efektywnie całkować w dziedzinie czasu z wykorzystaniem np. metody różnic skończonych lub metody charakterystyk [12]. Dla kontrastu podstawowa niedogodność związana z metodami pełnowymiarowymi objawia się w czasochłonności obliczeń numerycznych. Symulacja pojedynczego cyklu wedle doświadczeń [7, 9, 11] zajmuje czas mierzony w dobach, podczas gdy dla podejść 1D adekwatną jednostką są sekundy [12].

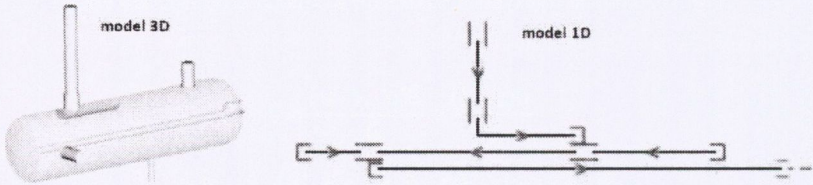
2. Metoda splotu

2.1. Motywacja i inspiracja

Istotą podejścia jednowymiarowego jest odwzorowanie rzeczywistej instalacji jako kompozycji odcinków rur odpowiednio ze sobą połączonych jak na rysunku 2. Wzdłuż

tychże rur całkowany jest przepływ, łączniki zapewniają zaś odpowiednie warunki brzegowe. Tego typu podejście dobrze sprawdza się w przypadku długich rur. Instalacje sprężarkowe zawierają jednak elementy o kształtach, gdzie określenie długości charakterystycznej jest problematyczne. Traktowanie tych, nastęrczących trudności interpretacyjnych elementów w sposób trójwymiarowy w symulacji nieustalanej oznacza drastyczne wydłużenie czasu trwania symulacji. Stąd wynika pomysł rozwiązania pośredniego – wykorzystania symulacji pełnowymiarowych do identyfikacji obiektu 3D a następnie wielokrotne wykorzystanie tej informacji poprzez wprowadzenie do modelu obliczeniowego obiektu typu czarna skrzynka.

Znane są prace eksplorujące tego typu koncepcje. W [2] prowadzona była 2D osiowosymetryczna identyfikacja impulsowa w dziedzinie czasu a wynikowy element przeznaczony był do implementacji w zespolonej metodzie obliczeniowej. W [10] przedstawiono koncepcję identyfikacji pełnowymiarowej prowadzonej w dziedzinie amplitudowo częstotliwościowej z przeznaczeniem do zastosowania w połączeniu z czasoprzestrzenną metodą charakterystyk. W [12] przebadano inną koncepcję – identyfikację impulsową obiektu w dziedzinie czasu, wprowadzanego następnie do symulacji czasoprzestrzennych, czemu poświęcona jest dalsza część artykułu.



Rys. 2. Model 3D i odpowiadający mu model 1D [12]

Fig. 2. An exemplary 3D model and its 1D representation [12]

2.2. Koncepcja metody

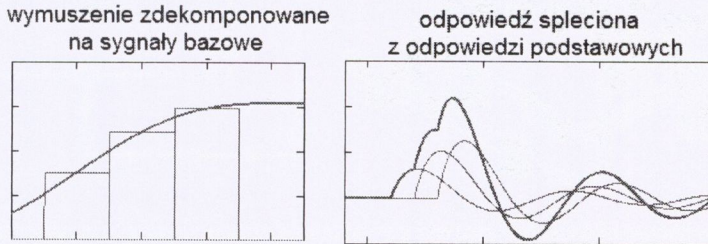
Na zaproponowaną metodę można spojrzeć jak na analogię metody zespolonej macierzy czterobiegunowej, w przypadku której ma miejsce mnożenie transformat Fouriera w przestrzeni amplitudowo-częstotliwościowej. Odpowiednikiem mnożenia w przestrzeni rzeczywistej jest splot (6) (7). Splot jest operacją liniową, co oznacza skalowalność i addytywność czyli podstawowe właściwości zasady superpozycji. Wykorzystując akustyczną dekompozycję całkowitego ciśnienia na część średnią oraz składowe fali biegnące w przeciwnych kierunkach dla danego obiektu, uprzednio zidentyfikowanego i opisanego macierzą bazowych odpowiedzi **[BRSM]** możliwe jest komponowanie w locie odpowiedzi układu na podstawie na bieżąco docierających sygnałów wejściowych, co ideowo przedstawia rysunek 3. Element macierzy $[BRSM]_{ij}$ jest odpowiedzią zarejestrowaną na porcie o indeksie j dla wymuszenia bazowego zadanego na port oznaczony indeksem i .

$$\mathcal{F}(f_1(t) * f_2(t)) = \mathcal{F}(f_1(t)) \cdot \mathcal{F}(f_2(t)) \quad (6)$$

$$(f_1 * f_2)(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot f(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

$$p = p_0 + p^+ + p^- \quad (8)$$

$$p^- = [\text{BRSM}] * p^+ \quad (9)$$



Rys. 3. Dekompozycja sygnału wymuszającego i odpowiadający jej splot odpowiedzi [12]

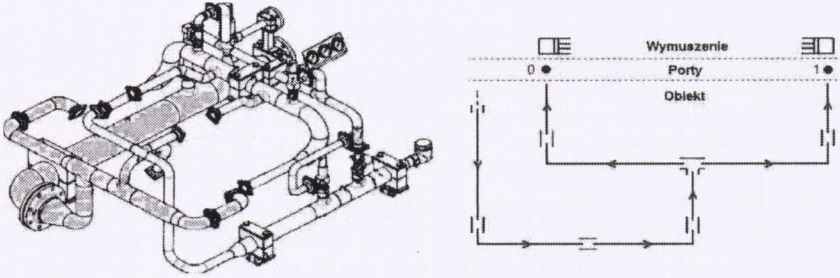
Fig. 3. Decomposition of excitation signal and convolution of response [12]

2.3. Weryfikacja

Na potrzeby weryfikacji przedstawionej koncepcji wykorzystano autorskie narzędzie symulacyjne, w którym obok tradycyjnych podejść czasoprzestrzennych 1D zaimplementowano metodę bazującą na opisanej technice splotu [12]. W [12] odwołano się do trzech rzeczywistych przypadków testowych. Za każdym razem weryfikacja przebiegała dwuetapowo. W pierwszym etapie porównano eksperymentalne dane pomiarowe pulsującego ciśnienia zebrane w tzw. punktach obserwacyjnych z odpowiadającymi przebiegami symulacyjnymi uzyskanymi z wykorzystaniem dwóch konkurencyjnych klasycznych metod czasoprzestrzennych. W drugim etapie pozytywnie zweryfikowane klasyczne metody służyły jako wzorzec dla metody splotu, porównaniu zaś poddano przebiegi czasowe zarejestrowane na portach przyłączeniowych. W niniejszej pracy odwołano się do jednego z przypadków opisanego szerzej także w [3].

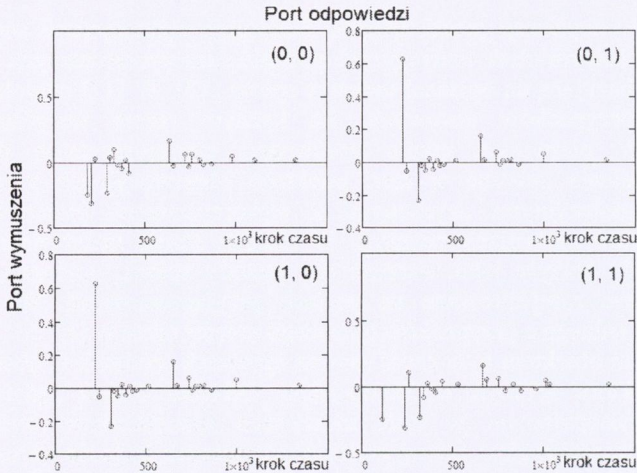
Symulowanym obiektem była część ssawna sprężarek (rysunek 4) obsługujących układ chłodzenia detektora ATLAS w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych – CERN. W związku z występującymi w tych maszynach specyficznymi awariami zaworów sprężarkowych przedsięwzięto szereg badań obejmujących badania materiałowe, pomiary drgań i pulsacji ciśnienia sporządzono także symulacje zjawisk pulsacyjnych. Na rysunku 5 przedstawiono macierz odpowiedzi impulsowych dla analizowanego modelu. Zestawienie przebiegów czasowych otrzymanych z użyciem rozważanych podejść symulacyjnych przedstawia rysunek 6. Obok badanej metody splotu jako odniesienie przedstawiono również podejście bazujące na równaniach bilansowych całkowanych przy pomocy metody

różnic skończonych oraz wykorzystujące akustyczne równanie falowe iterowane metodą charakterystyk. Otrzymałą zgodność przebiegów można uznać za satysfakcjonującą. Szczególnie dobrze odpowiadają sobie wyniki metod splotu oraz charakterystyk – obie metody wykorzystują akustyczny rozkład ciśnienia.



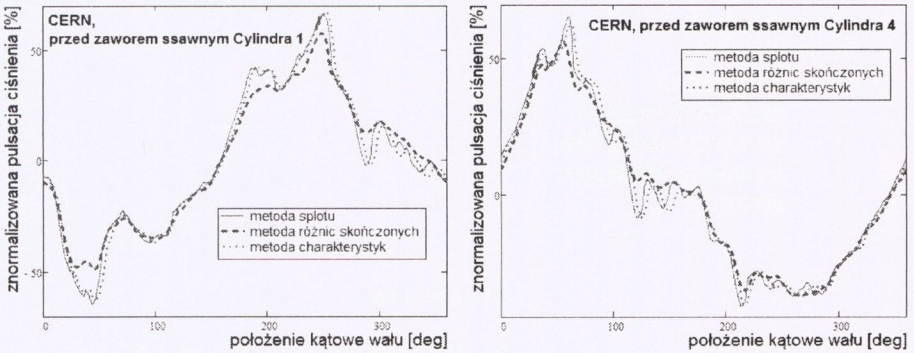
Rys. 4. Szkic geometrii kanałów sprężarki z wyróżnioną częścią ssawną oraz odpowiadającym jej modelem 1D [12]

Fig. 4. Geometry sketch of a compressor manifold with suction part highlighted and its 1D representation [12]



Rys. 5. Macierz odpowiedzi impulsowych dla analizowanego fragmentu instalacji

Fig. 5. Base Signal Response Matrix for impulse base excitation



Rys. 6. Zmienność ciśnienia na portach instalacji otrzymane za pomocą badanych podejść symulacyjnych dla pojedynczego cyklu [12]

Fig. 6. Pressure change in function of crank angle recorded at manifold ports over one cycle [12]

3. Podsumowanie

Nieustalone zjawiska przepływowe występujące w instalacjach sprężarek wyporowych mogą być źródłem kłopotów z niezawodnością. W celu im zapobieżenia pomocne są wszelkie techniki symulacyjne pozwalające identyfikować potencjalne zagrożenia z góry. Ostatnio szczególnym zainteresowaniem cieszą się podejścia czasoprzestrzenne, w których konieczne jest zasymulowanie nieustalonego przepływu na pewnym odcinku czasu. Wykorzystanie jednak geometrycznie pełnowymiarowego podejścia pociąga za sobą istotne uciążliwości związane ze znacznymi czasami obliczeniowymi. Po przeciwnej stronie można wskazać podejścia zredukowane jednowymiarowe powszechnie stosowane w praktyce inżynierskiej. W tym przypadku niższe o kilka rzędów wielkości czasy obliczeń okupione są założeniami upraszczającymi np. co do płaskości propagującej fali, sprawdzającymi się dobrze w przypadku długich rur. Dla elementów o bardziej złożonych kształtach zastosowanie techniki wykorzystującej koncepcję impulsowej identyfikacji obiektu można traktować jako szansę na zmniejszenie luki pomiędzy podejściami pełnowymiarowym a zredukowanym. Zaprezentowane rezultaty wskazują, że wykorzystanie metody splotu do wprowadzenia zidentyfikowanych impulsowo odpowiedzi układu do właściwych symulacji sprawdza się i jest istotnym krokiem ku temu.

Oznaczenia

A	– pole przekroju	[m ²]
$BRSM$	– macierz odpowiedzi bazowych	[–]
c	– prędkość dźwięku	[m/s]
d	– średnica	[m]
$f_{cut-off}$	– częstotliwość odcięcia	[Hz]
\mathcal{F}	– transformata Fouriera	[–]

p	– ciśnienie	[Pa]
t	– czas	[s]
T	– temperatura	[K]
w	– prędkość przepływu	[m/s]
x	– współrzędna położenia	[m]
κ	– wykładnik izentropy	[-]
ρ	– gęstość	[kg/m ³]

Literatura

- [1] Brun K, Bowles E. B. Jr, Deffenbaugh D. M.: *Development of a transient fluid dynamic solver for compression systems pulsations analysis*, 6th Conference of the EFRC, Dusseldorf 2008.
- [2] Cyklis P.: *Identyfikacja termodynamiczna elementów instalacji sprężarek waporowych – uogólnienie modelu Helmholtza*, Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
- [3] Cyklis P, Zelek G.: *Influence of the pressure pulsations in the refrigerating compressors manifoldson the reliability of the system*, The 23rd International Congress of Refrigeration, Praga 2011.
- [4] Fahy F.: *Foundation of engineering acoustics*, Elseviere, 2001.
- [5] Fefferman Ch. L.: *Existence and smoothness of the Navier-Stokes equation*, http://claymath.org/millennium/Navier-Stokes_Equations/navierstokes.pdf.
- [6] Łuszczycycki M.: *Zagadnienia tłumienia pulsacji ciśnienia w instalacjach sprężarek tłokowych*, Politechnika Krakowska, Kraków 1974.
- [7] Octavianity R, et al.: *Flow structure interaction 3D reciprocating analyses of compressor discharge valve*, Korean Society for Noise and Vibration Conference, 2007.
- [8] Prosnak W. J.: *Równania klasycznej mechaniki płynów*, PWN, Warszawa 2006.
- [9] Schiomi F. H, Takemori C. K, Deschamps C. J.: *Comparative analysis of different modeling approaches for valve dynamics of small reciprocating compressors*, International Conference on Compressors and Coolants, Papiernicka 2009.
- [10] Slis E, Lier L, Smeulers J.: *3D acoustics modeling in Pulsim for high frequency dynamics*, 6th Conference of the EFRC, Dusseldorf 2008.
- [11] Steinrueck H, Aigner R, Machu G.: *Transversal waves in reciprocating compressor*, Acta Mechanica, 2008.
- [12] Zelek G.: *Zastosowanie metody splotu do modelowania pulsacyjnego przepływu gazu w instalacji sprężarek waporowych*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2011.