

ZASTOSOWANIE METODY GRAFÓW WIĄZAŃ DO MODELOWANIA PRACY ZESPOŁU PRĄDOTWÓRCZEGO W SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

Summary: Paper presents issues of application bound graphs method for technical objects' modeling. As the object, marine power plant diesel generator has been taken. Diagram of model of bound graph for energetic system with different physically nature subsystems as well as model of bound graphs for diesel generator have been presented. Finally, main qualities of bound graphs application in the energetic systems modeling have been pointed out

1. WSTĘP

Agregaty prądotwórcze są autonomicznymi zespołami do wytwarzania energii elektrycznej. Zasadniczo składają się one z prądnicy synchronicznej o stałym napięciu, która jest napędzana silnikiem spalinowym.

Agregaty mają zastosowanie w dwóch dziedzinach:

- agregaty w zastosowaniu podstawowym służą do wytwarzania energii elektrycznej dla różnych potrzeb (siła napędowa, światło, ogrzewanie itp.) na tym obszarze, gdzie nie ma żadnych innych źródeł,
- agregaty prądotwórcze w zastosowaniu pomocniczym są wtedy stosowane, gdy normalna sieć rozdzielcza jest przerywana i z tego powodu mogą powstać szkody, lub przy przeciążeniach sieci.

Odkąd silnik jest urządzeniem przetwarzającym energię jest możliwość parametryzowania energii jako podstawowych zmiennych, które łączą inne składniki i procesy systemu. Energia przepływa tak, że przecięcia granic podsystemów są wyrażone kombinacją zmiennych opisujących główne podziały wewnątrz systemu. Typowym przykładem tego jest model silnika cylindrowego z jego różnorodnym przetwarzaniem energii z ciepła na ciśnienie i ruch. Taki model jest zaprezentowany jako graf wiązań. Wewnętrzne spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku jest przykładem połączenia systemu, gdzie występuje różnorodność wewnętrznych relacji pomiędzy termicznymi, hydraulicznymi i kinematycznymi procesami. Praca ta przedstawia analizy wielo-energetycznego systemu stosując metodę grafów wiązań. Zademonstrowane jest, że takie przetwarzanie energii może być reprezentowane przez komputerowo zaprojektowane modele.

Metoda grafów wiązań, oryginalna nazwa pochodzi z języka angielskiego - Bond Graphs Method. Za początek tej metody można przyjąć publikację Henrego M. Pyntera profesora Politechniki z Massachusetts – USA, która to ukazała się w 1961 r. Wkrótce potem również zagadnienie podjęli D. Karnopp oraz R. Rosenberg. Od tego czasu datuje się burzliwy rozwój metody grafów wiązań. I choć, jak każda metoda, także grafy wiązań mają ograniczone pole skutecznych zastosowań, to wobec istotnych różnic podejścia w stosunku do metod klasycznych, warto bliżej poznać tę metodę. Z punktu widzenia modelowania graf jest najbardziej zwięzłym zapisem sposobu połączeń elementów lub oddziaływań między elementami danego układu, a więc struktury układu.

Modelowanie tą metodą obejmuje zasadniczo dwie procedury: konstrukcję modelu graficznego w postaci grafu wiązań, konstrukcję modelu przyczynowo-skutkowego w postaci równań stanu.

Model graficzny za pomocą metody grafów wiązań odzwierciedla w przejrzystej postaci dynamiczną strukturę obiektu i może być w prosty sposób modyfikowany oraz może posłużyć do stworzenia i weryfikacji matematycznego modelu w postaci równań stanu. Równania stanu można układać również bez stosowania modelu graficznego. Zalety

metody grafów wiązań polegające na eliminacji błędów i znacznie łatwiejszej modyfikacji modelu, czynią procedurę układania równań stanu przy użyciu modelu graficznego bardziej przejrzystą i łatwiejszą. Możliwość prowadzenia eksperymentów symulacyjnych bezpośrednio w dziedzinie czasu jest jedną z zalet stosowania równań stanu do opisu modeli fizycznych.

Celem pracy jest opis zespołu prądotwórczego za pomocą grafów wiązań. Opisany zostanie silnik spalinowy wraz z prądnicą znajdujący się w siłowni statku m/v TUDOR STAR.

2. OPIS SYSTEMU ENERGETYCZNEGO ZA POMOCĄ GRAFÓW WIĄZAŃ

Podstawy prezentowanej w pracy metody modelowania zostały sformułowane w latach sześćdziesiątych przez profesora MIT Payntera. Ideą przewodnią tej metody było opracowanie jednolitego sposobu modelowania procesów energetycznych różnej naturze fizycznej. Metoda ta miała służyć do modelowania złożonych obiektów technicznych, w których zachodzą różnorakie procesy fizyczne, poczynwszy od mechaniki punktu materialnego poprzez mechanikę płynów, układy drgające, procesy elektryczne i magnetyczne, aż do procesów termodynamicznych i wymiany ciepła.

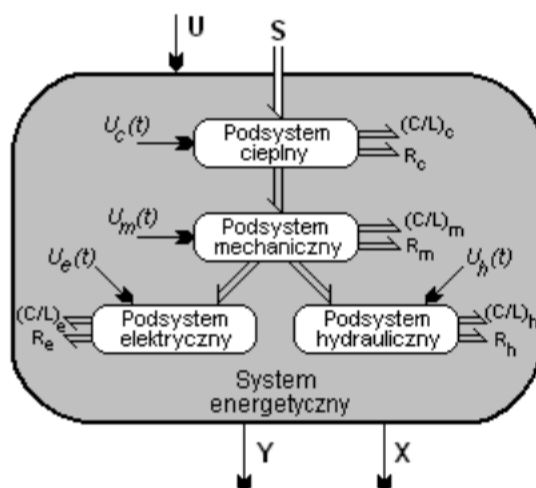
2.1. Modele systemów energetycznych

System energetyczny jest wyodrębnionym z otoczenia urządzeniem lub zespołem urządzeń współdziałających energetycznie lub sygnałowo. Doprowadzona do systemu energia jest przez niego przetwarzana na energię użyteczną, zgodnie z przeznaczeniem systemu. Pomiedzy otoczeniem a systemem mogą istnieć oddziaływania fizyczne i sygnałowe.

Przykładem takiego systemu energetycznego może być pojazd mechaniczny, w którym urządzeniami powiazanymi energetycznie są: silnik spalinowy, przekładnia, układ jezdy, układ kierowniczy, układ hamulcowy, nadwozie. Do systemu doprowadzana jest energia chemiczna zawarta w paliwie. Energia użyteczna przeznaczona jest do pokonywania oporów toczenia i powietrza oraz do rozpędzania pojazdu i pokonywania wzniesień.

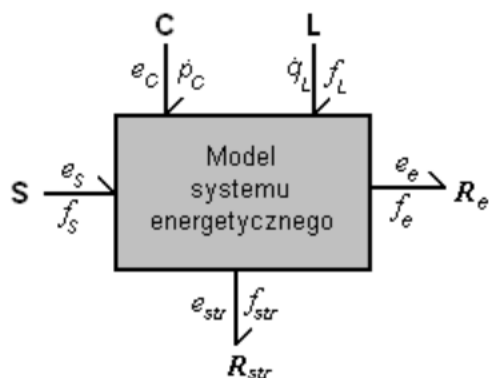
Procesy energetyczne, które zachodzą w urządzeniach składowych systemu mogą być różnej natury fizycznej, co uwidacznia system energetyczny statku. System taki składa się z silników spalinowych, w których zachodzą procesy termodynamiczne i mechaniczne, generatorów elektrycznych (procesy magnetyczne i elektryczne), układów hydraulicznych (procesy mechaniki płynów). W prezentowanej w pracy metodzie modelowania jest zastosowane jednolite podejście do opisu procesów energetycznych, niezależnie od ich natury fizycznej. Modele bardziej złożonych systemów budowane są z prostych powtarzalnych elementów. Przykład uproszczonego modelu systemu energetycznego grafów wiązań, w którym zawarte są podsystemy o różnej naturze fizycznej, przedstawia rys.1. W każdym podsystemie może być możliwość niezależnego sterowania. W przedstawionym modelu wektor sterowania składa się z wektorów sterowania wyodrębnionych w poszczególnych podsystemach:

$$U = \begin{bmatrix} U_c & U_m & U_e & U_h \end{bmatrix}^T$$



Rys. 1. Schemat modelu grafu wiązań systemu energetycznego zawierającego podsystemy o różnej naturze fizycznej.

Podstawowym celem modelowania za pomocą grafów wiązań jest prowadzenie badań symulacyjnych złożonych obiektów energetycznych w stanach nieustalonych. Parametrami dotyczącymi dowolnego systemu energetycznego są sprawności. Określenie sprawności energetycznej systemu w konwencji grafów wiązań wymaga wyodrębnienia grafów charakteryzujących energię użyteczną R_e (rys.2). Energia ta może być reprezentowana przez elementy dyssypacyjne lub akumulatory energii. Należy wyróżnić energię strat R_{str} i energię użyteczną. Do każdego systemu doprowadzony jest strumień energii ze źródła S . Na rys. 2 przedstawiony jest schemat modelu grafu wiązań systemu energetycznego z oznaczeniami uogólnionych parametrów energetycznych do określenia sprawności.



Rys. 2. Schemat i oznaczenia modelu grafu wiązań systemu energetycznego do określania sprawności.

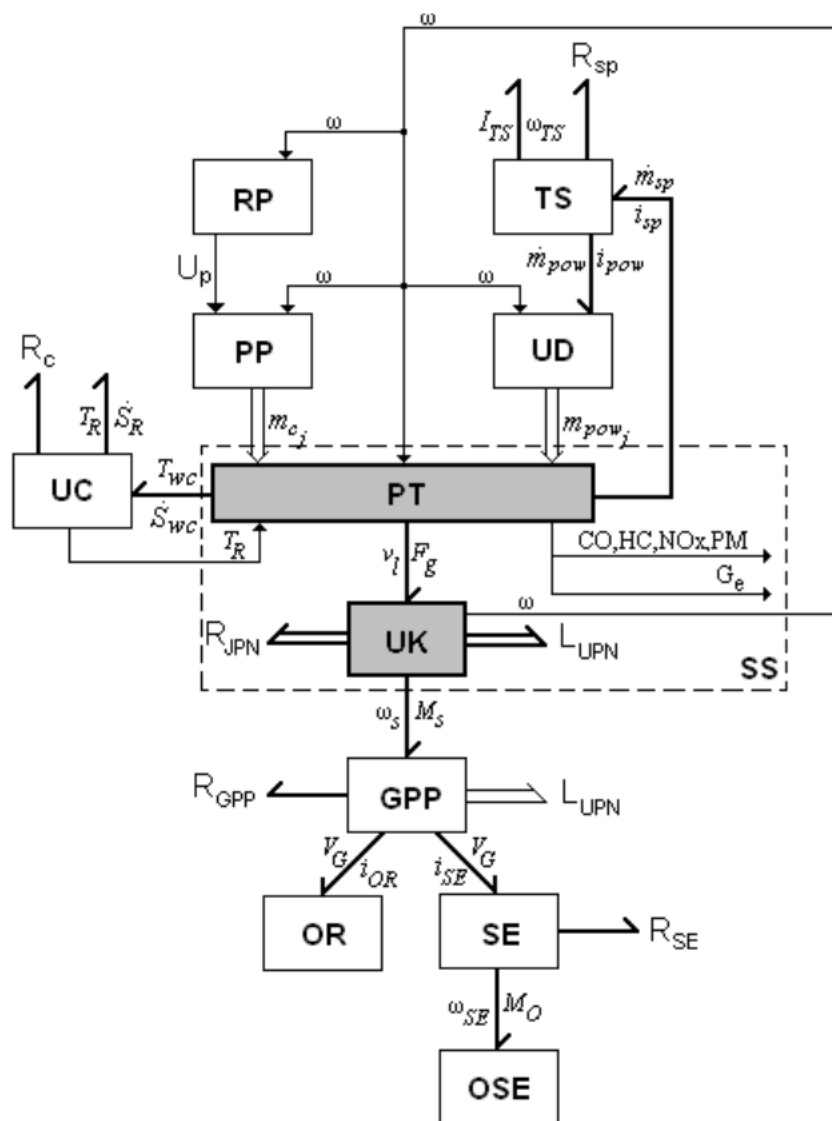
(e – uogólniony potencjał, f – uogólniony przepływ, p – uogólniony pęd, q – uogólnione przemieszczenie)

2.2. Opis obiektu analizy metodą grafów wiązań

W modelowaniu pracy silnika czterosuwowego brane są pod uwagę różne domeny energetyki, np.: mechanika, hydraulika i termika. Wał korbowy działa jak zmodulowany transformator przekształcając ruch obrotowy wału silnika na posuwisto-zwrotny ruch tłoka. Używając przestrzeni tłokowej, komora ciśnienia i prędkość zmian objętości są określane przez prędkość i siłę działające na tłok. Termodynamiczny akumulator i izentropowe dysze z różnymi wyjściami reprezentują odpowiednio komorę i zawory. Spalanie jest połączone z modelem przez zmodulowane źródło przepływu z mieszanką paliwowo-powietrzną. Wewnątrz komory znajdują się pseudo wiązania zachowujące wszystkie

obowiązujące zasady wiązań. Takie modele mogą być wykorzystywane do badania zachowań silnika czterosuwowego lub też do łączenia w całkowite modele pojazdów w celu obserwacji wszystkich charakterystyk ruchliwości (mobilności) takich pojazdów.

Modelowanie układów mechanicznych za pomocą grafów wiązań i równań stanu nie stanowi alternatywy dla mechaniki teoretycznej, lecz pozwala na traktowanie układu mechanicznego jako elementu systemu energetycznego zawierającego układy o różnej naturze fizycznej. Takie podejście pozwala na modelowanie całego systemu przy użyciu jednolitego aparatu teoretycznego do prowadzenia badań symulacyjnych. Model zespołu prądotwórczego opisany grafami wiązań pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Model grafów wiązań zespołu prądotwórczego: RP – regulator prędkości obrotowej; TS – turbosprężarka; PP – pompa paliwowa; UD – układ dolotowy; UC – układ cieplny akumulacji energii; PT – proces termodynamiczny; UK – układ korbowy; GPP – generator prądu przemiennego; OR – odbiorniki rezystancyjne; SE – silniki elektryczne; OSE – urządzenia napędzane przez SE

Przykładem takiego systemu jest elektrownia statku, w której generator prądu przemiennego (GPP) napędzany jest silnikiem spalinowym (SS). Odbiornikami energii są silniki elektryczne (SE) napędzające różne urządzenia (OSE) i

odbiorniki rezystancyjne (OR). Model silnika spalinowego składa się z modelu procesu termodynamicznego (PT) oraz z modelu układu korbowego (UK), który jest w tym systemie jedynym czysto mechanicznym układem.

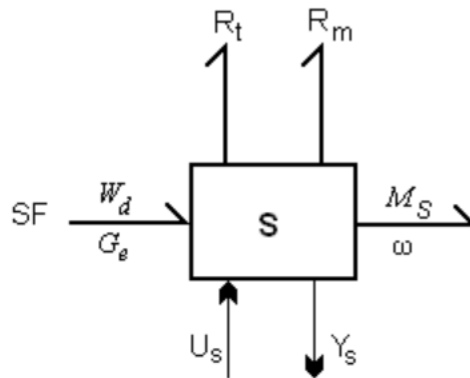
Można wprawdzie przedstawić model silnika w postaci zależności energetycznych, lecz ułożenie równań stanu w oparciu o ten model jest praktycznie niewykonalne. Model taki przedstawia w sposób jasny strukturę energetyczną silnika i stanowi podstawę do konstrukcji uproszczonych modeli, przy pomocy, których można prowadzić badania symulacyjne.

Uwagę należy zwrócić na możliwość łączenia w tym modelu grafów przyczynowo-skutkowych (w formie strzałki) z grafami wiązań (w formie półstrzałki).

Podstawowym aparatem matematycznym mechaniki analitycznej jest rachunek wektorowy, natomiast formalizm grafów wiązań, w swej podstawowej formie, operuje wielkościami skalarnymi. Oznacza to, że parametry energetyczne, jak i uogólniony potencjał e i przepływ f , będące z natury wektorami, są w modelu grafów wiązań miarami tych wektorów odniesionymi do tej samej osi.

Model silnika o działaniu ciągłym oparty jest na jego charakterystyce statycznej. Zastąpienie charakterystyką statyczną silnika złożonej dynamiki przetwarzania energii zawartej w paliwie na energię mechaniczną jest uproszczeniem, którego dopuszczalność powinna być właściwie wykazana dla każdego przypadku. Na rys. 4 [4] przedstawiony jest uproszczony model grafów wiązań silnika spalinowego, na podstawie, którego zdefiniowana jest charakterystyka statyczna silnika.

Parametrami energetycznymi pierwotnego źródła energii SF są: wartość opałowa W_d oraz sekundowe zużycie paliwa G_e . Parametrami strumienia energii wyjściowej są: moment obrotowy M_S oraz prędkość kątowa wału korbowego ω . Straty energetyczne podzielono na straty procesu termodynamicznego R_t i straty mechaniczne R_m .



Rys. 4. Podstawowy model grafu wiązań silnika spalinowego. U_s – wektor sterowania; Y_s – wektor wyjść

Zbiór możliwych do osiągnięcia parametrów energii wyjściowej (M_S , ω) tworzy pole pracy silnika L_S . Wielowymiarową charakterystykę silnika definiuje się jako funkcję wektorową:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{f}_2(M_S, \omega); (M_S, \omega) \subseteq L_S \quad (1)$$

Głównymi składowymi wektora parametrów wyjściowych $\mathbf{Y}_s$ są:

- moc silnika $N_e = M_S \cdot \omega$,
- dawka paliwa na cykl m_C ,

- sekundowe zużycie paliwa G_e ,
- jednostkowe zużycie paliwa $g_e = G_e / M_S \cdot \omega$,
- sprawność ogólna silnika $\eta_O = M_S \cdot \omega / G_e \cdot W_d$,
- położenie organu sterowania silnikiem U_S ,
- kąt wyprzedzenia zapłonu α_z ,
- jednostkowa emisja składników toksycznych.

Charakterystykę w postaci (1) otrzymuje się na podstawie pomiarów założonych w punktach $\{M_{Si}, \omega_i\} \subseteq L_S$. Charakterystyka ta powinna być w postaci ciągłej funkcji analitycznej utworzonej przez aproksymację punktów pomiarowych. Transformacja strumienia ciepłej energii potencjalnej zawartej w paliwie ($G_e \cdot W_d$) ma wyjściową moc ($M_S \cdot \omega$) jest realizowana w złożonym procesie termodynamicznym obejmującym spalanie, nieustaloną wymianę ciepła i masy oraz przemiany termodynamiczne opisywane przybliżonymi zależnościami empirycznymi.

3. UWAGI KOŃCOWE

Główną zaletą stosowania metody grafów wiązań i równań stanu do modelowania systemów energetycznych o złożonej strukturze (siłownie okrętowe) jest możliwość modelowania systemu o różnej naturze fizycznej przy zastosowaniu jednakowych podstaw teoretycznych. Dalszą istotną zaletą tej metody jest możliwość upraszczania i rozwijania modelu energetycznego systemu w zależności od celu, któremu ma służyć wykonywany model.

W modelu zespołu prądotwórczego w formie grafu wiązań przedstawionego na rys. 3 można wyróżnić zasadnicze części tworzące jego całość. Upraszczając graf procesu termodynamicznego i układu korbowego w jeden graf silnika spalinowego rys. 4 można przedstawić jego parametry energetyczne. W tym przypadku:

- uogólnionymi potencjałami e są: wartość opałowa W_d , siła tłokowa F_t , moment obrotowy M_S ,
- uogólnionymi przepływami f są: sekundowe zużycie paliwa G_e , prędkość tłoka v_t , prędkość obrotowa ω .

Bibliografia

1. Grzebieniak R.: Zeszyt naukowy Akademia Morska w Szczecinie „Podstawy Modelowania za Pomocą Grafów Wiazań” 2005r. s 35
2. Arczewski K, Goraj Z, Pietrucha J.: „Elementy Modelowania w Mechanice”, Warszawa 1983, s164
3. Cichy M.: „Modelowanie systemów energetycznych”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2001.
4. Cichy M.: „Silniki o działaniu cyklicznym – podstawy teorii i działania”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1989.
5. Cichy M., Kneba Z.: „Wykorzystanie grafów wiązań i równań stanu do modelowania siłowni okrętowych”. Materiały XVIII Sympozjum Siłowni Okrętowych Gdynia 1996.
6. Cichy M., Makowski S.: „Modelowanie systemów energetycznych z silnikami spalinowymi za pomocą grafów wiązań i równań stanu”.

APPLICATION OF BOUND GRAPHS METHOD FOR MARINE POWER PLANT DIESEL GENERATOR'S OPERATION MODELING

Paper presents issues of application bound graphs method for technical objects' modeling. As the object, marine power plant diesel generator has been taken. Diagram of model of bound graph for energetic system with different physically nature subsystems as well as model of bound graphs for diesel generator have been presented. Finally, main qualities of bound graphs application in the energetic systems modeling have been pointed out

ZASTOSOWANIE METODY GRAFÓW WIĄZAŃ DO MODELOWANIA PRACY ZESPOŁU PRĄDOTWÓRCZEGO W SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

W artykule przedstawiono problematykę zastosowania w modelowaniu obiektów technicznych metody grafów wiązań. Jako obiekt wybrano zespół prądotwórczy pracujący w siłowni okrętowej. Przedstawiono również schemat modelu grafu wiązań systemu energetycznego zawierającego podsystemy o różnej naturze fizycznej, jak również model grafów wiązań zespołu prądotwórczego. W końcowej części przedstawiono główne zalety stosowania metody grafów wiązań w modelowaniu systemów energetycznych.