

PODOBIENSTWA I RÓŻNICE KOMPLEKSOWYCH STRUKTUR ROZGRYWAJĄCYCH PARAMETRYCZNIE W BADANIU WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH UKŁADÓW MASZYNOWYCH

Adam DEPTUŁA*, Marian A. PARTYKA*

* Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska
e-mail: m.partyka@po.opole.pl
e-mail: a.deptula@po.opole.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 24.02.2012 r. Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w sierpniu 2012 r.

W opracowaniu przedstawiono zastosowanie grafów zależności i drzew rozgrywających parametrycznie do analizy i syntezy własności dynamicznych układów maszynowych. Podano rozkłady grafu od różnych wierzchołków początkowych oraz podobieństwa i różnice w kompleksowych strukturach drzewiastych, które opisują dopuszczalne podukłady danego układu maszynowego. Uwzględniono możliwość znalezienia wspólnej części wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie z rozpisaniem na oddzielne parametry konstrukcyjne i/lub eksploatacyjne.

Słowa kluczowe: układ hydrauliczny, graf zależności, kompleksowe struktury rozgrywające parametrycznie, optymalizacja

WSTĘP

Optymalne przeprojektowanie układu maszynowego na inne warunki pracy wymaga podejmowania szeregu decyzji. Im układ maszynowy jest bardziej skomplikowany, tym liczba decyzji jest większa. Tablice decyzyjne [3] i funkcje logiczne [17, 18, 19] mają zastosowanie w zagadnieniach modelowania układów maszynowych, które opisane są równaniami różniczkowymi (zwykłymi lub cząstkowymi). Wynika to z faktu, że występujące elementy nieliniowe można rozdzielić na skończoną liczbę elementów (części) liniowych, co prowadzi do otrzymania kilku układów liniowych w sensie przebiegu modelowania z pierwotnego pojedynczego układu nieliniowego. Występujące parametry konstrukcyjne mają wpływ na przebieg nieznanych funkcji zależnych od czasu. Tradycyjna analiza typu Wejście → Wyjście i Wyjście → Wejście danego układu metodą grafu zależności prowadzi do otrzymania grup wierzchołkowych o następujących własnościach:

- elementy wewnątrz danej grupy mają dużo połączeń informacyjnych;
- poszczególne grupy mają wzajemnie mało połączeń informacyjnych.

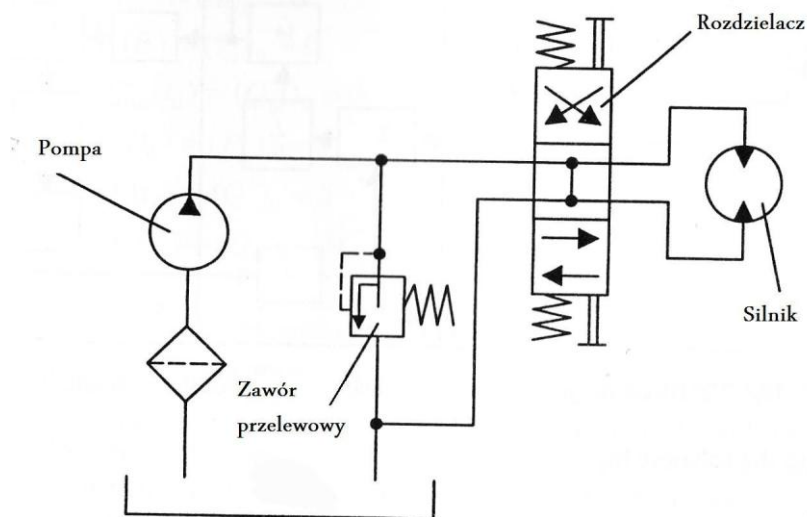
W ten sposób otrzymuje się wytyczne konstrukcyjne. Należy zaznaczyć, że istnieje możliwość otrzymania wielokrotnych rozwiązań z grafu zależności i dlatego selekcję odpowiednich podrozwiązań można przeprowadzić z wykorzystaniem klasyfikatorów drzewiastych z sieci neuronowych. Zarówno w tworzeniu wiedzy dla potrzeb przedsiębiorstwa, jak i w określeniu wytycznych konstrukcyjnych dla projektanta niezbędne jest posługiwanie się odpowiednim narzędziem opisującym proces decyzyjny. Główną płaszczyzną realizacji tego procesu jest zbiór decyzji (i relacji między nimi), z jakich decydent może skorzystać w celu rozwiązania problemu. Do takich narzędzi należą m.in. grafy zależności rozgrywające parametrycznie.

1. ZASTOSOWANIE GRAFU ZALEŻNOŚCI PRZEPIYU SYGNAŁÓW

Zagadnienie modelowania układów mechanicznych za pomocą grafów sprowadza się m.in. do analizy i syntezy, gdzie korzysta się z analogii wynikającej z identycznego ich opisu matematycznego. Grafy i liczby strukturalne od dawna odgrywają rolę modeli układów mechanicznych [20, 21] i nadal są systematycznie rozwijane [1, 2, 13]. W odróżnieniu od grafów, struktury dendrytowo-drzewiaste nie mają cykli, ale może istnieć różna liczba wierzchołków początkowych. Dlatego takie struktury mają zastosowanie do wariantowego przeszukiwania i optymalizacji rozwiązań projektowanego układu, np.: [18, 19]. Odmienne podejście może być przeprowadzone jako przetłumaczenie skierowanego grafu zależności na strukturę drzewiastą rozgrywającą parametrycznie [10, 11]:

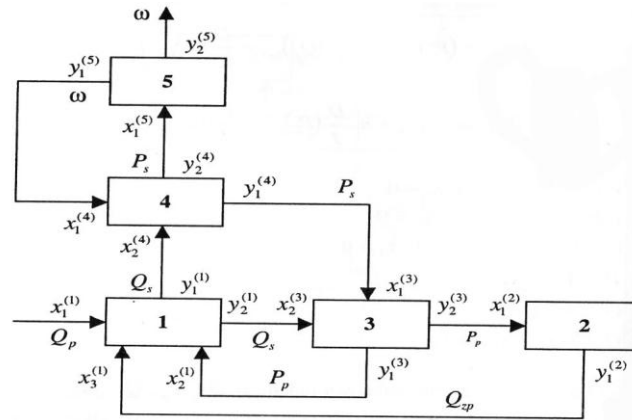
Przykład

Dla układu hydraulicznego (rys. 1), składającego się z pompy zębatej, zaworu przelewowego, rozdzielacza i silnika obciążonego dużym masowym momentem bezwładności, można napisać strukturę systemową (rys. 2) [12].



Rys. 1. Schemat hydrauliczny układu

Źródło: Opracowano na podstawie [12]



Rys. 2. Struktura systemowa układu hydraulicznego

Źródło: Opracowano na podstawie [4]

Model matematyczny powyższego układu ma postać:

- 1) równanie natężenia przepływu z pompy:

$$Q_s = Q_p 1(t) - \frac{1}{R_{p0}} P_p - Q_{zp}, \text{ gdzie } \frac{1}{R_{p0}} = \frac{1}{R_{pp}} + \frac{1}{R_{pz}} + \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_s} \quad (1)$$

oraz:

P_p - ciśnienie w linii tłocznej pompy;

Q_p - wydajność teoretyczna pompy;

Q_{zp} - natężenie przepływu przez zawór przelewowy;

Q_s - natężenie przepływu podawane do części odbiorczej układu;

- 2) równanie zaworu przelewowego:

$$Q_{zp} = 0 \text{ dla } P_p \leq P_0$$

$$\frac{dQ_{zp}}{dt} = \frac{K}{T} P_p - \frac{1}{T} Q_{zp} \text{ dla } P_p > P_0 \quad (2)$$

- 3) równanie strat ciśnienia

$$P_p = R_l Q_s + P_s \quad (3)$$

gdzie:

P_s - spadek ciśnienia między komorami roboczymi silnika

- 4) równanie przepływowowe silnika

$$\frac{dP_s}{dt} = \frac{1}{C} Q_s - \frac{D}{C} \omega \quad (4)$$

gdzie:

ω - prędkość kątowa wału silnika

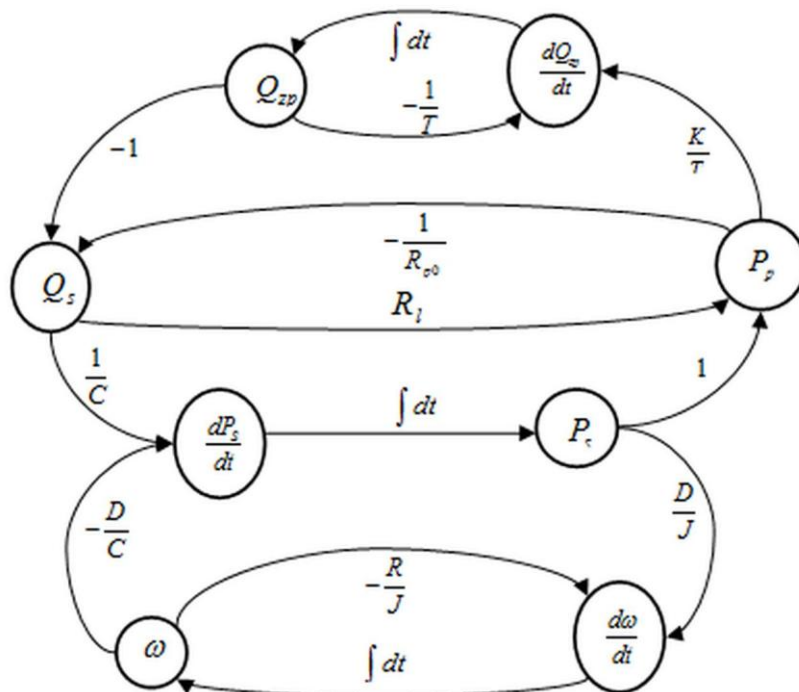
5) równanie momentów silnika

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{D}{J} P_s - \frac{R}{J} \omega, \text{ tzn. } J \frac{d\omega}{dt} = DP_s - R\omega \quad (5)$$

Z równań dynamiki można określić wzajemne powiązania wszystkich funkcji zależnych od czasu. W wyniku zapisania i przeprowadzenia rozkładu grafu zależności tych funkcji, otrzymuje się grupy rozkładu, które strukturalnie opisują własności kolejnych podukładów danego układu maszynowego [4].

1.1. Graf zależności dla struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie

Graf definiuje się jako uporządkowaną parę zbiorów. Pierwszy z nich zawiera wierzchołki grafu, a drugi składa się z krawędzi grafu, czyli uporządkowanej pary wierzchołków. Analizowany układ hydrauliczny (rys. 2), składający się z elementów połączonych ze sobą w sposób umożliwiający przepływ sygnałów, może być zapisany za pomocą grafu zależności dla struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie (rys. 3) [5, 6, 7]. Należy zaznaczyć, że dany układ może być analizowany jako układ zamknięty i wtedy konieczne jest sprzężenie zwrotne powodujące, że sygnał wejściowy zależy także od aktualnej wartości sygnału wyjściowego. Dlatego konieczne jest wprowadzenie w zapisie grafu zależności dodatkowego wierzchołka początkowego Q_p połączonego z wierzchołkiem końcowym ω powrotną decyzją przejścia k . Takie podejście zaprezentowano m.in. w [6].



Rys. 3. Skierowany graf zależności przepływu sygnałów

Źródło: Opracowanie własne

Skierowany graf zależności (rys. 3) składa się ze zbioru wierzchołków (opisujących funkcje zależne od czasu) oraz ze zbioru krawędzi, czyli uporządkowanej pary wierzchołków opisujących parametry konstrukcyjne i/lub eksploatacyjne oraz przekształcenia analityczno-algebraiczne.

Rozkład grafu od wybranego wierzchołka w pierwszym etapie prowadzi do struktury drzewiastej z cyklami, a potem do ogólnej struktury drzewiastej rozgrywającej parametrycznie [5, 6, 7]. Każda ze struktur posiada właściwy zapis analityczny: G_i^+ oraz G_i^{++} , gdzie i oznacza wierzchołek, od którego dokonano rozkładu grafu. Należy zaznaczyć, że jako wierzchołki początkowe wybierane są tylko te, które opisują daną funkcję zależną od czasu, a nie jej pochodną (rozkład grafu od dwóch wierzchołków związanych z tą samą wielkością nie wpływa na właściwości struktury rozgrywającej parametrycznie, gdyż oba wierzchołki związane są ze sobą pojedynczą krawędzią – decyzją oznaczającą przekształcenie analityczne). Zatem zbiór V' wierzchołków, od których jest możliwy rozkład grafu zależności, można zapisać:

$$V' = \{Q_s, P_s, \omega, P_p, Q_{zp}\}$$

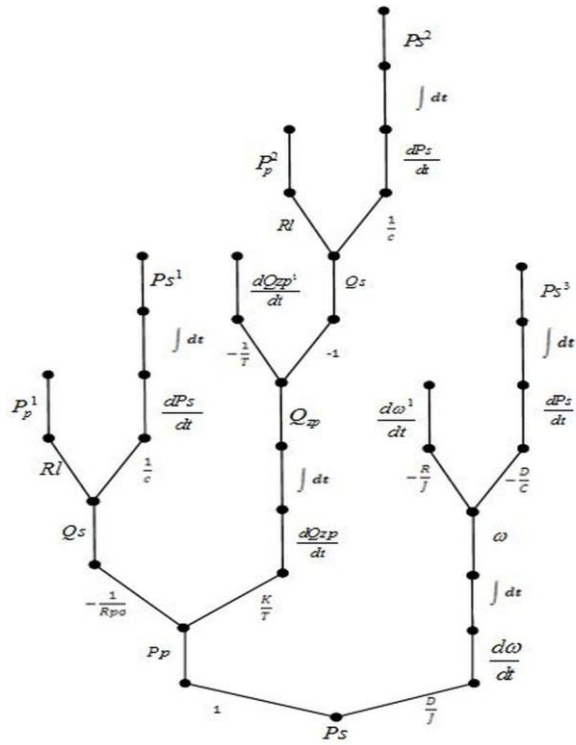
Rozkładając graf od każdego z wierzchołków, otrzymuje się zbiór D struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie:

$$D = \{G_{Q_s}^{++}, G_{P_s}^{++}, G_{\omega}^{++}, G_{P_p}^{++}, G_{Q_{zp}}^{++}\}$$

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono struktury rozgrywające parametrycznie kolejno od wierzchołków P_s i P_p opisanych równaniami (6) i (7).

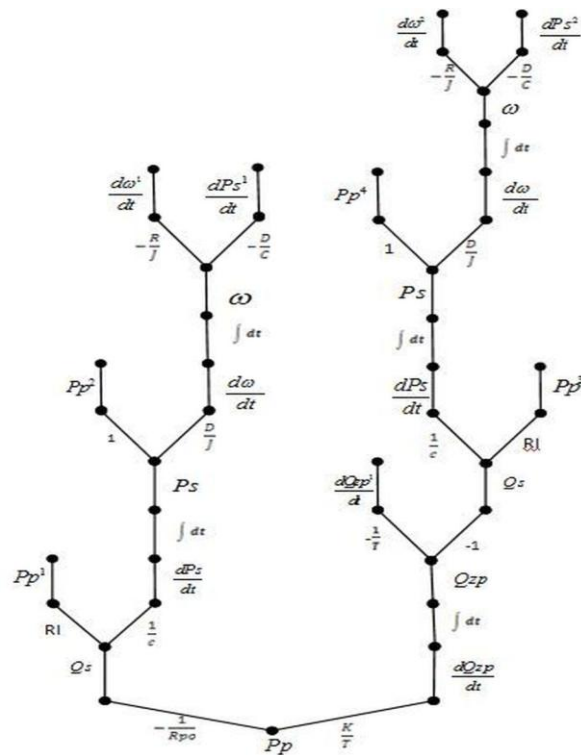
$$\begin{aligned} G_{P_s}^{++} = & ({}^0 P_s ({}^1 1 P_p ({}^2 - \frac{1}{R p o} Q_s ({}^3 R l P_p^1, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{d t} ({}^4 \int dt P_s^1)^4)^3, \frac{K}{T} \frac{d Q_{z p}}{d t} \\ & ({}^3 \int dt Q_{z p} ({}^4 - \frac{1}{T} \frac{d Q_{z p}^1}{d t}, -1 Q_s ({}^5 R l P_p^2, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{d t} ({}^6 \int dt P_s^2)^6)^5)^4)^3)^2, \\ & \frac{D}{J} \frac{d \omega}{d t} ({}^2 \int dt \omega ({}^3 - \frac{D}{C} \frac{d P_s}{d t} ({}^4 \int dt P_s^3)^4, -\frac{R}{J} \frac{d \omega^1}{d t})^3)^2)^1)^0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} G_{P_p}^{++} = & ({}^0 P_p ({}^1 - \frac{1}{R p o} Q_s ({}^2 R l P_p^1, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{d t} ({}^3 \int dt P_s ({}^4 1 P_p^2, \frac{D}{J} \frac{d \omega}{d t} ({}^5 \int dt \omega ({}^6 - \frac{D}{C} \frac{d P_s^1}{d t}, -\frac{R}{J} \frac{d \omega^1}{d t})^6)^5)^4)^3)^2 \\ & , \frac{K}{T} \frac{d Q_{z p}}{d t} ({}^2 \int dt Q_{z p} ({}^3 - \frac{1}{T} \frac{d Q_{z p}^1}{d t}, -1 Q_s ({}^4 R l P_p^3, \frac{1}{C} \frac{d P_s}{d t} ({}^5 \int dt P_s ({}^6 1 P_p^4, \frac{D}{J} \frac{d \omega}{d t} ({}^7 \int dt \omega \\ & ({}^8 - \frac{D}{C} \frac{d P_s^2}{d t}, -\frac{R}{J} \frac{d \omega^2}{d t})^8)^7)^6)^5)^4)^3)^2)^1)^0 \end{aligned} \quad (7)$$



Rys. 4. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego P_s

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5. Struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie od wierzchołka początkowego P_p

Źródło: Opracowanie własne

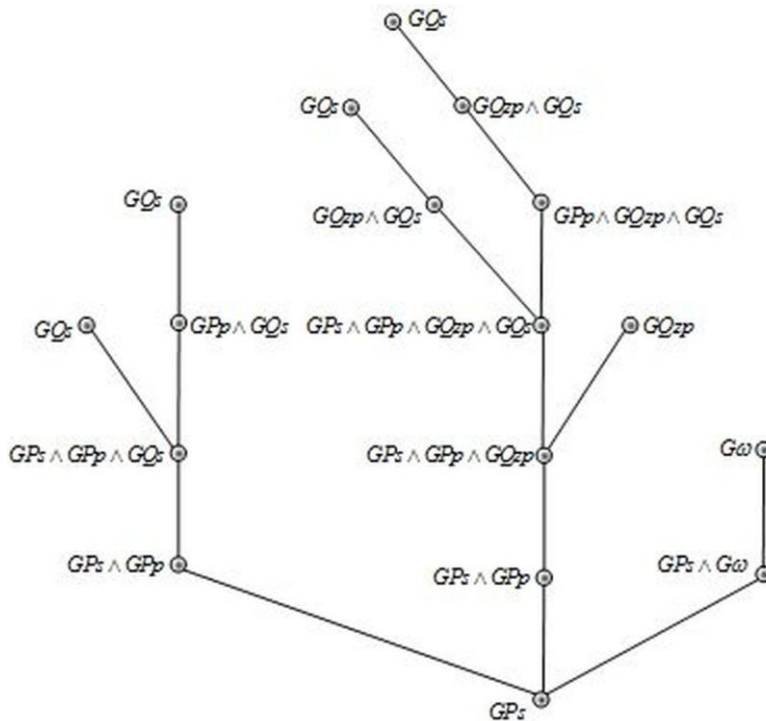
2. KOMPLEKSOWE STRUKTURY DRZEWIASTE ROZGRYWAJĄCE PARAMETRYCZNIE

Struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie od każdego wierzchołka początkowego różnią się między sobą kształtem i własnościami. Opisują proces decyzyjny i przestrzeń możliwych do uzyskania stanów pracy układu hydraulicznego po wcześniejszych zmianach parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Istotną sprawą jest wyodrębnienie z grafu zależności najważniejszych stanów determinowanych przez wierzchołki, a także najważniejszych decyzji determinowanych przez krawędzie. W tym celu buduje się kompleksowe struktury drzewiaste.

Kompleksowa struktura drzewiasta rozgrywająca parametrycznie powstaje poprzez nałożenie wszystkich struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie od każdego z wierzchołków na strukturę rozgrywającą od ustalonego wcześniej wierzchołka. W związku z tym istnieje zbiór S struktur rozgrywających parametrycznie:

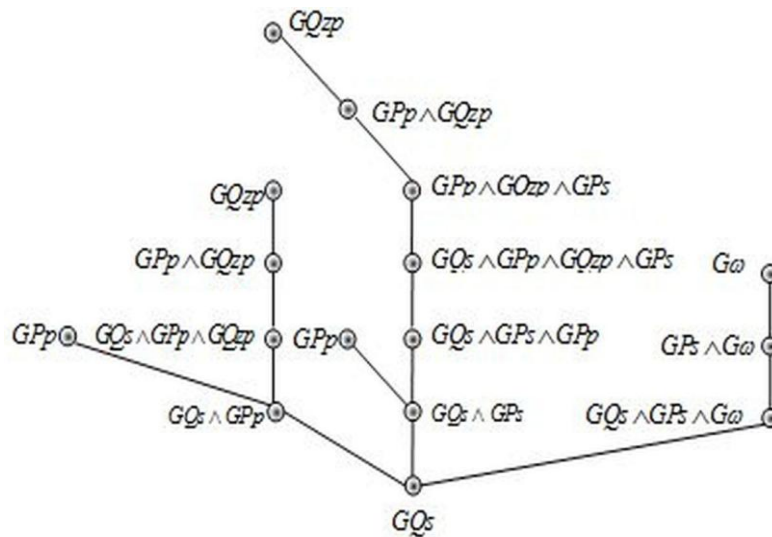
$$S = \{S_{G_{Q_s}}, S_{G_{P_s}}, S_{G_{\omega}}, S_{G_{P_p}}, S_{G_{Q_{zp}}}\}$$

gdzie np.: $S_{G_{Q_s}}$ – oznacza strukturę kompleksową powstałą poprzez nałożenie wszystkich struktur drzewiastych rozgrywających parametrycznie ze zbioru D na strukturę rozgrywającą parametrycznie od ustalonego wcześniej wierzchołka $G_{Q_s}^{++}$. Na rysunkach 6 – 9 przedstawiono cztery struktury rozgrywające parametrycznie: $S_{G_{P_s}}$, $S_{G_{Q_s}}$, $S_{G_{P_p}}$, $S_{G_{\omega}}$



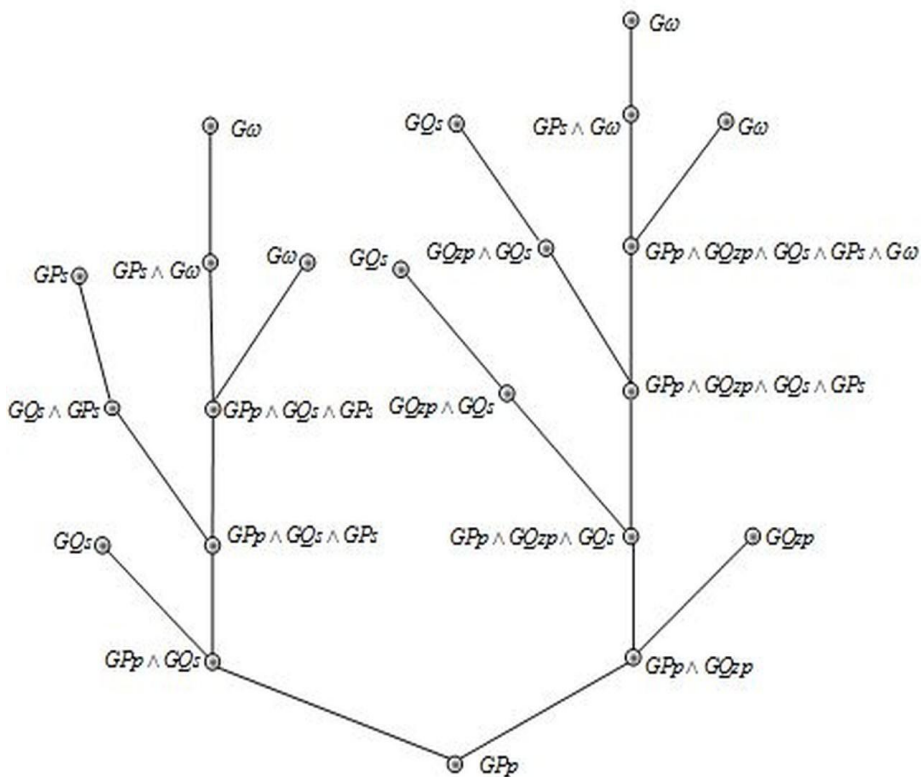
Rys. 6. Struktura kompleksowa $S_{G_{P_s}}$

Źródło: Opracowanie własne



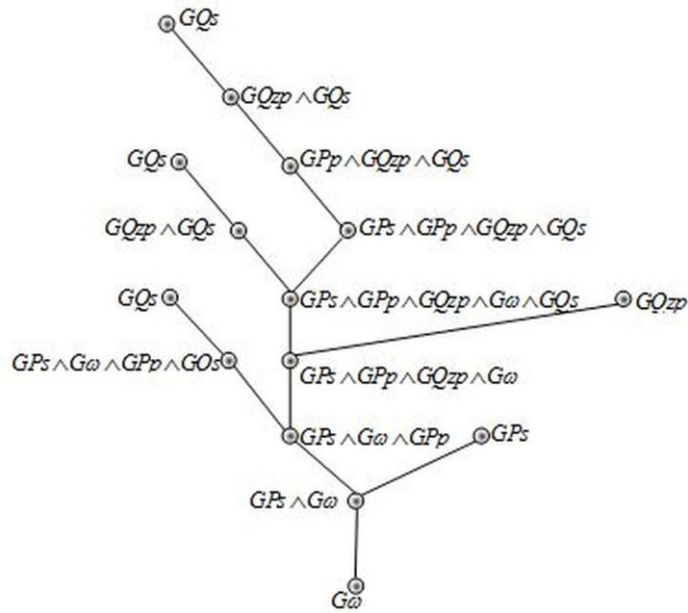
Rys. 7. Struktura kompleksowa $S_{G_{Q_s}}$

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 8. Struktura kompleksowa $S_{G_{P_p}}$

Źródło: Opracowanie własne



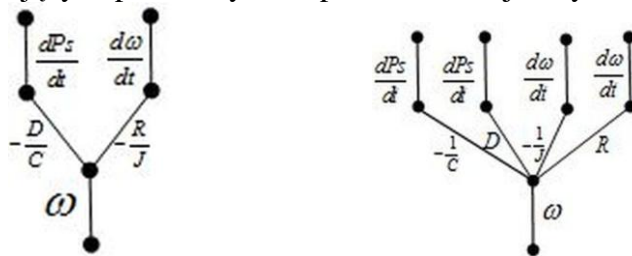
Rys. 9. Struktura kompleksowa $S_{GQ\omega}$

Źródło: Opracowanie własne

Węzły na kompleksowych strukturach drzewiastych odpowiadają decyzjom, przekształceniom analityczno-algebraicznym i stanom właściwym dla danej struktury rozgrywającej parametrycznie. Jeśli odpowiednie fragmenty struktur rozgrywających parametrycznie pokrywają się, wówczas węzeł opisuje koniunkcje takich struktur.

Węzeł na strukturze kompleksowej, będący iloczynem wszystkich elementów ze zbioru D , nazywa się pełny i oznaczany jest γ .

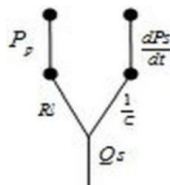
Na strukturze kompleksowej S_{GP_p} z rysunku 8 występuje jeden taki węzeł opisany iloczynem $GP_p \wedge GQ_zp \wedge GQ_s \wedge GP_s \wedge G\omega$. Odpowiada on wspólnej części wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie przedstawionej na rys.10.



Rys. 10. Część wspólna wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie (z ewentualnym rozpisaniem na oddzielne parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne) na strukturze S_{GP_p}

Źródło: Opracowanie własne

Podobnie na strukturze kompleksowej $S_{G\omega}$ istniejący jeden węzeł pełny odpowiada wspólnej części wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie przedstawionej na rysunku 11.



Rys. 11. Część wspólna wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie na strukturze $S_{G\omega}$

Źródło: Opracowanie własne

Oznacza to, że niezależnie od jakiego ustalonego wcześniej wierzchołka następuje rozkład skierowanego grafu zależności z rys. 3, proces decyzyjny na pewno będzie przebiegał poprzez elementy z rys. 10 i 11, chociaż elementy różnią się między sobą w odpowiednich strukturach.

WNIOSKI

Kompleksowe struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie mogą być zbudowane od dowolnych ustalonych wcześniej wierzchołków początkowych, opisujących stany analizowanego układu. Złożoność decyzyjna takich struktur zależy od ustalonego wcześniej wierzchołka początkowego rozkładu. Niektóre kompleksowe struktury drzewiaste rozgrywające parametrycznie mogą zawierać węzły pełne, które posiadają wspólną część wszystkich struktur rozgrywających parametrycznie, odpowiadających dopuszczalnym stanom układu. Jednak węzły pełne na odpowiednich strukturach występują w różnych miejscach, co oznacza wcześniejsze lub późniejsze odwiedzenie danego węzła (stanu) podczas przeszukiwania rozwiązań w procesie optymalizacji. Ponadto węzłom pełnym na różnych strukturach odpowiadają inne stany układu i parametry konstrukcyjne i/lub eksploatacyjne. Na przykład w przedstawionym przykładzie na każdym węzle pełnym występuje parametr c . Oznacza to, że niezależnie od jakiego ustalonego wcześniej wierzchołka następuje rozkład grafu zależności, proces optymalizacyjny na pewno będzie przebiegał poprzez elementy węzła pełnego, do którego wchodzi parametr c . Złożoność decyzyjna kompleksowych struktur rozgrywających parametrycznie zachowuje grafikę obiegu informacji dla przypadku, gdy połączenia wierzchołkowe zostaną opisane pojedynczymi parametrami konstrukcyjno-eksploatacyjnymi w miejsce dosłownych oznaczeń według układu równań algebraiczno-różniczkowych. Istnieje możliwość wprowadzenia dalszych modyfikacji oraz uogólnień.

LITERATURA

1. Buchacz A., *Computer Aided Synthesis of Bar Systems Characterized by a Cascade Structure Represented by Graphs*; 1st Inter. Confer. on Graphs and Mechanics, Ustroń 1993 (vol. 1), Polit. Śląsk., Gliwice 1993.
2. Buchacz A., *Projektowanie układów prętowych ze względu na zadane widmo częstotliwości*, [w:] „Transport Przemysłowy”, nr 2(32) - supl./2008.
3. Cholewa W., Kaźmierczak J., *Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów*, Skrypt, nr 1904, Politechnika Śląska, Gliwice 1995.
4. Coner L., Koziarska A., Partyka M.A., *Zastosowanie klasyfikatorów drzewiastych i grafów zależności o różnym stopniu szczegółowości w CAD procesów decyzyjnych na*

- przykładzie układów maszynowych*, Konfer. Cylinder 1999 – Badanie-Konstrukcja-Wytwarzanie-Eksploatacja Układów Hydraulicznych, Zakopane 1999.
5. Deptuła A., Partyka M.A., *Kompleksowe struktury rozgrywające parametrycznie w badaniu własności dynamicznych układów maszynowych*, IV Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Zakopane 2011, Pol. Towarz. Zarz. Prod. PTZP.
 6. Deptuła A., Partyka M.A., *Zastosowanie grafów rozgrywających parametrycznie i dekompozycji w procesie optymalizacji dynamicznych struktur systemowych*, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, nr 3/2010, Wrocław 2010.
 7. Deptuła A., Partyka M.A., *Zastosowanie grafów zależności i drzew rozgrywających parametrycznie w procesie innowacji na przykładzie układów maszynowych*, XIII Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie; Zakopane 2010, Pol. Towarz. Zarz. Prod. PTZP 2010.
 8. Hong S. I., Ostapko D.L., *On the complementation of Boolean functions*, IEEE Trans. Comp., 1975, 24.
 9. Kaczanowski S., Olszewski M., Wański Z., *Płynowe elementy i układy logiczne*, WKiŁ, Warszawa 1971.
 10. Kazimierczak J., *System cybernetyczny*, Wiedza Powszechna-Omega, Warszawa 1978.
 11. Kazimierczak J., *Teoria gier w cybernetyce*, Wiedza Powszechna-Omega, Warszawa 1973.
 12. Lipski J., *Napędy i sterowania hydrauliczne*, WKiŁ, Warszawa 1981.
 13. Orlikowski C., *Symbolic Analysis of Bond Graphs by Application of Coate's Rule*, 1st Inter. Confer. on Graphs and Mechanics, Ustroń 1993 (vol. 1), Polit. Śląsk., Gliwice 1993.
 14. Palczak E., *Modelowanie układów hydraulicznych za pomocą grafów Coatesa*, [w:] „Sterowanie i Napęd Hydrauliczny”, nr 3/93, Warszawa 1993.
 15. Partyka M.A., *An application of structural Boolean decisions to the CAD of mechanical systems*, [w:] “AMSE Confer. Model Simul.”, Karlsruhe 1987, AMSE Period. Model. Sim. Cont., 1988, vol.17, No.4.
 16. Partyka M.A., Deptuła A., *Badanie własności dynamicznych układów maszynowych z uwzględnieniem wielokrotnej numeracji wierzchołkowej dla drzew rozgrywających parametrycznie*, [w:] „Napędy i Sterowanie”, nr 3/2010, Warszawa 2010.
 17. Partyka M.A., *Logika systemów projektowania na przykładzie CAD układów maszynowych*, [w:] „St. i Monogr.”, nr 105/1999, Ofic. Wydaw. Polit. Opole., Opole 1999.
 18. Partyka M.A., *Some remarks on the Quine – Mc Cluskey minimization algorithm of multiple – valued partial functions for design structures*, 7th Inter. Cong. Log. Method. Phil. Sc., Salzburg 1983, Austria.
 19. Partyka M.A., *The Quine – Mc Cluskey minimization algorithm of individual multiple – valued partial functions for digital control systems*, 3rd Inter. Confer. Syst. Engin., Wright State University, Dayton 1984, USA.

20. Wojnarowski J., Buchacz A., Nowak A., Świder J., *Modelowanie drgań układów mechanicznych metodami grafów i liczb strukturalnych*, Skr. Nr 1266, Polit. Śląsk., Gliwice 1986.
21. Wojnarowski J., *Grafy i liczby strukturalne jako modele układów mechanicznych*, Inst. Podst. Konst. Masz. Polit. Śląsk., Gliwice 1977.

SIMILARITIES AND DIFFERENCES OF COMPLEX PARAMETRIC GAME TREES FOR INVESTIGATIONS OF DYNAMIC PROPERTIES OF MACHINE SYSTEMS

Summary

The paper concerns the application of dependence graphs and game tree-structures for the analysis and synthesis of the dynamic properties of machine systems. Graph distributions starting from various beginning vertices are presented in this paper. In order to illustrate the acceptable subsystems of parent machine system, similarities and differences between complex parametric trees are also given. It is also possible to find the part common to all the game tree-structures and describe it over separate design or operational parameters.

Keywords: *hydraulic system, dependence graph, complex parametric game structures, optimization*