

Kazimierz SZEWCZYK, Andrzej GARBACIK, Wiesław CICHOCKI
Instytut Maszyn Roboczych
Politechnika Krakowska

GRAF WIĘZÓW W MODELOWANIU DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI UKŁADU HYDRAULICZNEGO

Streszczenie. W artykule podjęto problem tłumienia pulsacji ciśnienia w hydraulicznych układach napędowych ze szczególnym uwzględnieniem sposobu doboru akumulatora hydraulicznego. Wskazano na metodę grafu więzów jako dogodną przy modelowaniu hydraulicznych układów z akumulatorem.

BOND – GRAPH NOTATION IN MODELLING OF HYDRAULIC POWER SYSTEM

Summary. The authors investigated the method of absorption pressure fluctuation by means of accumulators. This paper discusses Bond-Graph methods and dynamic test approaches for the study of pressure transients in hydraulic power system.

BONDGRAPH IN DER MODELLIERUNG DER HYDRAULISCHEN ANTRIEBSSYSTEME

Zusammenfassung. In der vorliegenden Arbeit wurden der Notation von Bond-graphen (die Bindungsdiagramme) für der Modellierung der hydraulischen Antriebssysteme dargestellt. Die vorgestellte Methode präsentiert der ausgewählten Probleme der Stoß- und Pulsationöldämpfung mit Hilfe von Druckflüchtigkeitspeichern. Darüber hinaus ermöglicht diese Methode auch den Einfluß der Position von Strukturelementen eines hydraulischen Systems auf den Verlauf von dynamischen Erscheinungen zu untersuchen.

1. WSTĘP

Współczesne prace teoretyczne w dziedzinie napędu i sterowania hydraulicznego maszyn koncentrują się na identyfikacji czynników, które mają wpływ na powstawanie i wielkość dynamicznych zmian ciśnienia w tych układach, oraz wyznaczeniu możliwości

minimalizacji skutków ich występowania. Dynamiczne zmiany ciśnienia (pulsacje, uderzenia hydrauliczne) mają swoje źródło zarówno w pracy jednostek napędowych, jakimi są pompy i silniki hydrauliczne oraz również w pracy takich elementów, jak np: zawory sterujące, regulatory przepływu. Są one skutkiem zmiennego charakteru obciążeń układu, jak również sposobu jego przesterowania. Pulsacje ciśnienia propagują się w układzie hydraulicznym w postaci fali ciśnieniowej, co powodować może takie niekorzystne zjawiska, jak np.:

- zmęczeniowe uszkodzenia w elementach i przewodach,
- nieprawidłowości w pracy i sterowaniu (w tym zakłócenia w układach automatycznego sterowania),
- obniżenie sprawności układu,
- zwiększenie emisji akustycznej układu (hałasu) itp.

Celowe jest tu podkreślenie, że amplituda pulsacji ciśnienia często przekracza bardzo znacznie (ponad 100%) wartość ciśnienia ustawionego na zaworze przelewowym (bezpieczeństwa). Wynika to z faktu, że zawory te z natury rzeczy charakteryzując się dużą stałą czasową, w odniesieniu do częstotliwości fali ciśnieniowej i nie reagują na tak szybkie zmiany ciśnienia, a tym samym nie zabezpieczają układu. Badania wykazały, że praktycznie jedynym sposobem racjonalnego kształtowania (tłumienia) tych zjawisk jest zastosowanie właściwie dobranego akumulatora hydraulicznego lub rezonatora komorowego (tłumika pulsacji, filtru) [3],[4].

2. ZAGADNIENIE DOBORU AKUMULATORA HYDRAULICZNEGO

Procesy absorpcji pulsacji i amortyzacji uderzeń hydraulicznych mimo wielu prac z tego zakresu [1], [4], [5] nie zostały ciągle w sposób wyczerpujący przebadane, a znane prace w tej dziedzinie nie stworzyły jednolitych wytycznych odnośnie do racjonalnego doboru akumulatora. Aby uzyskać odpowiedź, kiedy, gdzie i w jaki sposób zainstalować akumulator by spełniał on wymagania użytkowe, jako element kształtujący zjawiska dynamiczne w układzie, należy kompleksowo uwzględnić wszystkie istotne parametry układu oraz akumulatora (w tym głównie jego objętość i impedancję wejściową) [1], co związane jest z analizą układu hydraulicznego z akumulatorem jako całości. Akumulator bowiem spełnia funkcję filtru reaktywnego i filtru absorbującego zmiany energii, przy czym miejsce włączenia akumulatora do układu stanowi węzeł rozplywu energii hydraulicznej, który uzależniony jest od przemian energetycznych w akumulatorze. Z powyższych uwag wynika, że właściwy dobór akumulatora, by mógł on skutecznie tłumić w układzie pulsacje ciśnienia, stanowi istotny i złożony problem przy modelowaniu hydraulicznych układów.

Z punktu widzenia projektanta tych układów warto zauważyć, że w literaturze przedmiotu nie sposób jest znaleźć nawet ogólnych i jednoznacznych wytycznych związanych z doбором akumulatorów jako tłumików uderzeń czy pulsacji ciśnienia. Wiadomo jest natomiast, że zdolność akumulatora do pochłaniania energii pulsacji i uderzeń hydrau-

licznych powstałych w układzie określają nie tylko parametry wyznaczające jego stan energetyczny, lecz również warunki jego współpracy z układem oraz charakter i zakres zmienności zjawisk dynamicznych występujących w układzie. Problem doboru akumulatora nie może być zatem sprowadzony (jak to sugerują informacje techniczne przedstawiane przez producentów akumulatorów) do zbilansowania energetycznej pracy sprężania gazu w akumulatorze i energii kinetycznej przepływającego czynnika. Analiza literatury z zakresu modelowania hydraulicznych układów z akumulatorem wskazuje, że skuteczną drogą jest badanie transmitancji układu z akumulatorem przy zastosowaniu analizy częstotliwościowej [1],[3].

Metoda ta polega na wyznaczeniu częstotliwości rezonansowej ω_u układu z akumulatorem i porównanie jej z częstotliwością ω_z generowanych wymuszeń w układzie (zakłóceń). Najlepszy efekt tłumienia pulsacji ciśnienia uzyskuje się wówczas, gdy podstawowa częstotliwość tłumiąca ω_u ujawniona na wykresie transmitancji układu hydraulicznego z akumulatorem w postaci charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej pokrywa się z pasmem częstotliwości wymuszeniowej o najwyższej amplitudzie generowanym przez źródło zakłóceń. Przy użyciu tej metody możliwe jest określenie relacji, jakie powinny być zachowane pomiędzy takimi parametrami, jak: objętość akumulatora i rozmiary jego przyłącza (określone jego długością i średnicą) oraz ciśnienie wstępnego naładowania akumulatora, by mógł on skutecznie tłumić określone pasmo częstotliwości. Metoda ta ma jednak pewne ograniczenia, a mianowicie jej zastosowanie dotyczy w zasadzie jedynie układów, które mogą podlegać linearyzacji oraz układów, które mogą być opisane parametrem skupionym, a ponadto nie umożliwia ona przebadania wpływu miejsca usytuowania akumulatora w układzie. Dla rozwiązania tych zagadnień konieczne jest opracowanie metody umożliwiającej modelowanie (w możliwie najprostszym sposobie) układu hydraulicznego z akumulatorem (przy uwzględnieniu wszystkich istotnych parametrów jego pracy) w celu przeprowadzenia stosownych analiz. Możliwość takie stwarza metoda grafu więzów, która stanowi przystępne i uniwersalne narzędzie przy modelowaniu hydraulicznych układów napędowych i sterujących [6].

3. NOTACJA GRAFU WIĘZÓW

Grafy więzów są swoistym formalizmem, pozwalającym stworzyć model matematyczny na podstawie modelu fizycznego, bez konieczności wnikania w szczegóły budowy różniczkowych równań ruchu. Zastosowanie notacji grafu pozwala uprościć etapy formułowania opisu matematycznego przez zastąpienie go opracowaniem grafu na podstawie modelu fizycznego i wprowadzeniem tego opisu do systemu komputerowego, który rozwiązuje równania ruchu zawarte w strukturze grafu. Uzyskuje się to za pomocą specjalnych języków i programów symulacyjnych, np.: UNISYS [7], ACSL, CSSL, [2],[5].

Konstrukcja grafu więzów w najbardziej skrótowym ujęciu polega na zastąpieniu elementów danego układu i zachodzących w nim zjawisk połączonymi elementami grafu. Zapis w notacji grafu więzów odwzorowuje przepływ mocy pomiędzy poszczególnymi elementami układu (grafu), który określany jest jako iloczyn dwóch zmiennych: przeplywo-

wych i wyteżeniowych. Kierunek przepływu mocy znaczonej jest za pomocą półstrzałek, natomiast zależności przyczynowo – skutkowe definiuje poprzeczna kreska (bar) umieszczana na końcu pojedynczego symbolu grafu (bondu). W zorientowanym grafie (tzn. takim, w którym wszystkie zmienne stanu i zmienne sterujące są od siebie uzależnione bez sprzeczności) struktura dynamiczna dowolnego układu może być przedstawiona za pomocą elementów: źródła wyteżeniowego SE (generatora zmiennej wyteżeniowej), źródła przepływowego SF (generatora zmiennej przepływowej), rezystancji R (elementu reprezentującego rozproszenie energii), pojemności C (elementu magazynującego energię potencjalną), inercji I (elementu magazynującego energię kinetyczną), węzła przepływowego O, węzła wyteżeniowego 1.

W programach symulacyjnych weryfikacja poprawności sformułowania modelu matematycznego, z punktu widzenia zachodzących w nim zgodności przyczynowo-skutkowych oraz zasady zachowania energii są przeprowadzane algorytmicznie, na podstawie zbudowanego grafu. Również w sposób algorytmiczny następuje formułowanie wynikowych równań różniczkowych lub różniczkowo - algebraicznych nieliniowych I rzędu. Proces wyboru algorytmu całkowania odpowiedniego dla własności fizycznych i matematycznych, takich jak: sztywność numeryczna, dokładność całkowania, gładkość rozwiązania, a także dobór parametrów całkowania, w tym np. dobór kroku całkowania, może być także w dużej mierze realizowany automatycznie. Poniżej zaprezentowany zostanie, dla przykładowego układu hydraulicznego z akumulatorem, skonstruowany graf, co umożliwi interaktywny dobór parametrów dla tego układu i uzyskanie pożądaných dynamicznych parametrów jego pracy.

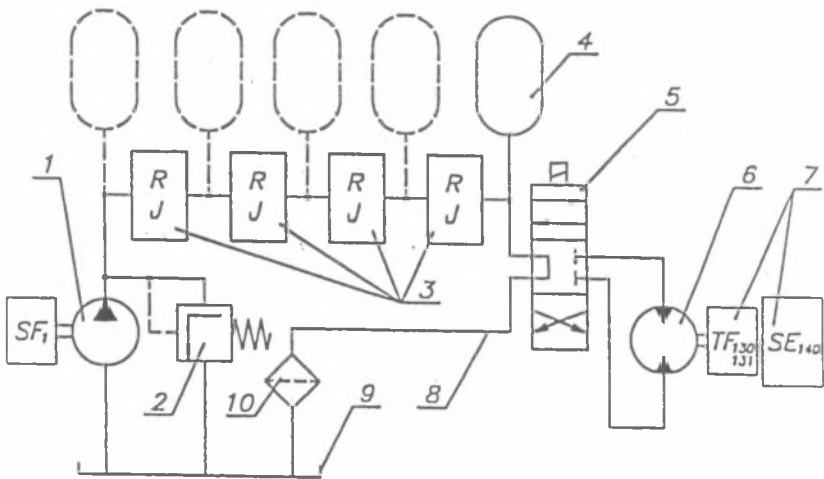
4. PREZENTACJA PROBLEMU NA PRZYKŁADZIE UKŁADU HYDRAULICZNEGO Z AKUMULATOREM

Do analizy przyjęto układ hydrauliczny pracujący w obiegu otwartym przedstawiony na rys. 1, którego głównymi elementami są: pompa zasilana ze stałego źródła zmiennej przepływowej (co oznacza, że zmiany obciążenia układu nie powodują zmian jej prędkości obrotowej), zaworu przelewowego dwustopniowego, czterech odcinków linii ciśnieniowej (opisanych przez czteromasowy układ), akumulatora hydraulicznego włączanego kolejno do poszczególnych odcinków linii ciśnieniowej, rozdzielacza sterowanego elektromagnetycznie, oraz silnika hydraulicznego obciążonego stałym momentem obrotowym. Celem analizy było określenie przebiegu zmian ciśnienia w układzie w poszczególnych jego punktach oraz zbadanie wpływu miejsca usytuowania akumulatora i jego parametrów konstrukcyjnych na przebieg ciśnienia w wybranych punktach układu. W związku z tym zbudowano graf więzów przedstawionego układu w postaci jak na rys.2. Poszczególne bondy w tym grafie reprezentują właściwości przyjętej struktury układu, przy czym: bondy od 1 do 3 dotyczą pompy, bondy od 5 do 34 odwzorowują linię ciśnieniową, bondy od 37 do 51

Metodę grafu więzów opracował Amerykanin H.Paynter, a rozwinęli ją w latach siedemdziesiątych również Amerykanie: D.Karnopp i R.C.Rosenberg. W piśmiennictwie polskim stosowane są różne nazwy: grafy więzów, grafy wiązań, grafy sprzężone jako synonimy angielskiej nazwy bond-graph.

odzworowują akumulator w różnych jego usytuowaniach w układzie, bondy od 52 do 83 odzworowują dwustopniowy zawór przelewowy, bondy od 90 do 108 opisują działanie rozdzielacza, natomiast bondy 110 do 122 opisują silnik hydrauliczny, a bondy od 130 do 142 jego obciążenie, bondy 150 do 154 dotyczą filtra zainstalowanego w linii zlewowej, gdzie bondy 160, 84 reprezentują linię zlewową.

Przy obliczeniach numerycznych przyjęto następujące dane: objętościowe natężenie przepływu $Q_p = f_2 = 160 \text{ dm}^3/\text{min}$, ciśnienie ustawienia zaworu przelewowego $p_z = SE_{64} = 8 \text{ MPa}$, gęstość oleju $\rho = 840 \text{ kg/m}^3$, moduł ścisłości z uwzględnieniem zapowietrzenia układu wyrażono poprzez $B = f(p)$, przy czym $B_{max} = 2000 \text{ MPa}$, średnica i długość przewodu wynosiły odpowiednio; $d = 20 \text{ mm}$, $l = 12 \text{ m}$, ciśnienie obciążenia $p_o \geq p_z$.



Rys. 1. Schemat układu hydraulicznego, gdzie: 1 – pompa, 2 – zawór przelewowy, 3 – ciśnieniowa linia hydrauliczna (czteromasowa), 4 – akumulator, 5 – rozdzielacz 3/4 sterowany elektromagnetycznie, 6 – silnik hydrauliczny, 7 – obciążenie, 8 – linia zlewowa, 9 – zbiornik hydrauliczny, 10 – filtr

Fig. 1. Scheme of the hydraulic system where: 1 – pump, 2 – overflow valve, 3 – pressure line, 4 – accumulator, 5 – directional control valve, 6 – hydraulic motor, 7 – load system, 8 – relief line, 9 – fluid reservoir, 10 – filter

Wymuszenie w układzie realizowano poprzez skokowe przesterowanie rozdzielacza (czas przesterowania $t < 0.01s$). Eksperyment obejmował badania wpływu parametrów konstrukcyjnych akumulatora (objętości, rezystancji przyłącza i ciśnienia wstępnego nala-dowania), jak również badania wpływu miejsca usytuowania akumulatora na przebieg pulsacji ciśnienia w różnych punktach układu. Przykładowo na rys. 3 przedstawiono wy-niki badań numerycznych dotyczące wpływu objętości akumulatora V_{ak} na jego własności tłumiące w prezentowanym układzie, przy czym przedstawione przebiegi dotyczyły pun-ktu bezpośrednio położonego przy źródle wymuszenia (p33). Analogicznie przedstawie można czasowe przebiegi ciśnień dla dowolnego punktu linii hydraulicznej, i jak wykazały badania, najlepszy efekt tłumienia pulsacji uzyskuje się, gdy akumulator znajduje się w bezpośredniej bliskości źródła wymuszenia. Obrazują to przebiegi przedstawione na rys.4, gdzie zestawiono przebiegi zmian ciśnienia w p5 (przy pompie) oraz w p33 (przy rozdzielaczu) dla dwóch przeciwstawnych usytuowań akumulatora.

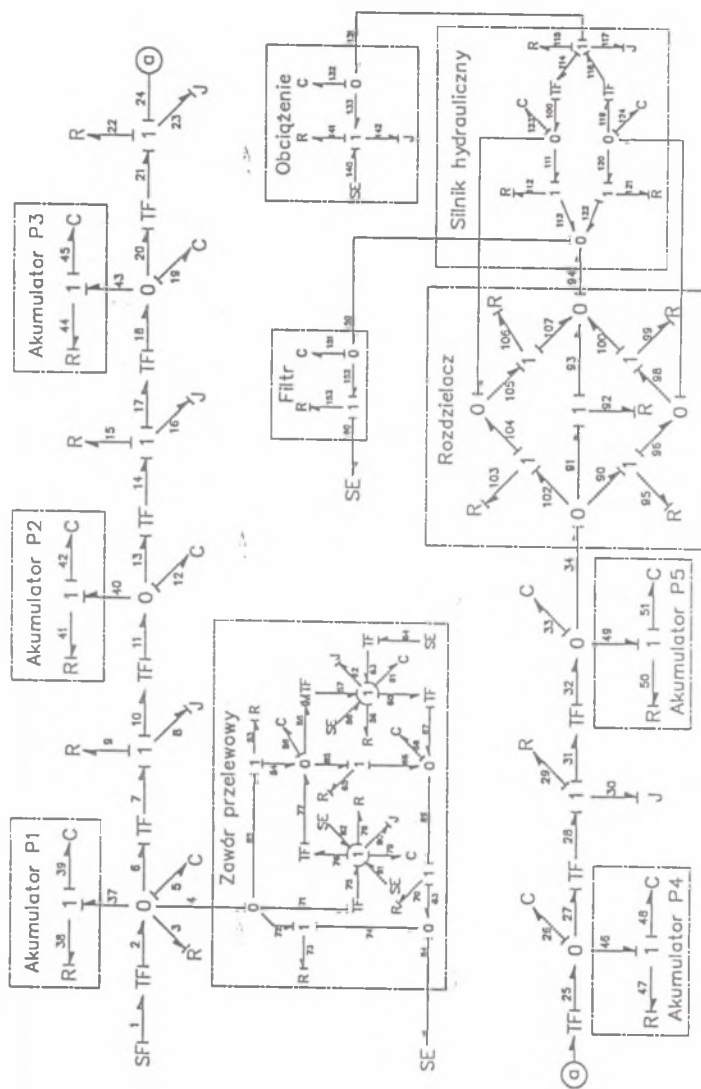
5. PODSUMOWANIE

Zjawiska dynamiczne w linii hydraulicznej mogą być kształtowane praktycznie jedynie przez zastosowanie właściwie dobranych tłumików w postaci akumulatora hydraulicznego lub rezonatora komorowego, przy czym wymagania związane z właściwym doбором aku-mulatora dotyczą głównie: miejsca usytuowania akumulatora w układzie, rezystancji jego przyłącza i pojemności użytecznej akumulatora.

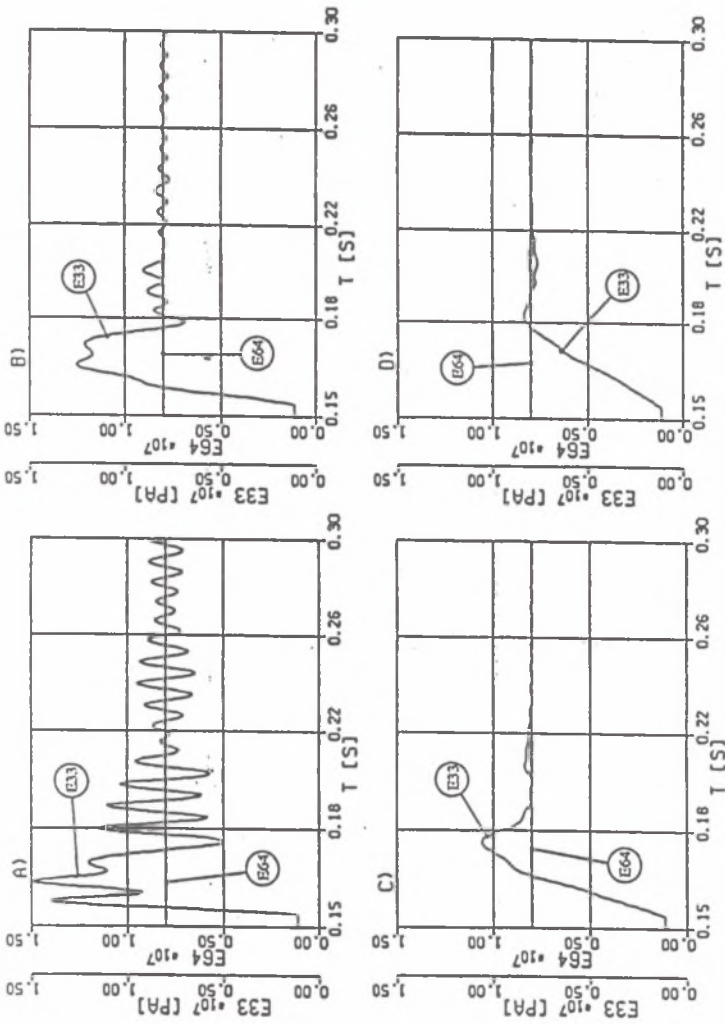
Notacja grafów, przy zastosowaniu pakietu symulacyjnego ACSL, stanowi uniwersalne narzędzie, które przy modelowaniu układów hydraulicznych może być wykorzystane do modelowania elementów i zespołów hydraulicznego napędu przy uwzględnieniu nieli-niowości wynikających z zapowietrzenia, zmiany gęstości cieczy lub nieliniowego obciążenia. Ponadto metoda grafu węzłów ułatwia modelowanie wielomasowych układów i umożliwia przebadanie wpływu rozmieszczenia elementów struktury dynamicznej.

W konkluzji końcowej należy stwierdzić, że reprezentacja modeli w formalizmie grafu węzłów charakteryzuje się szeregiem pożytecznych właściwości, wśród których warto dodatkowo podkreślić, że:

- Metoda grafu węzłów ułatwia budowę modelu globalnego oraz ocenę wpływu poszczegól-nych parametrów, jak również dokonanie uzasadnionych uproszczeń układu.
- Z punktu widzenia teorii sterowania, grafy węzłów umożliwiają uzyskanie takiego zbioru zmiennych stanu, który ma bezpośrednią interpretację fizyczną, i który wska-zuje rodzaj sprzężeń zwrotnych, jakie należy zastosować, by zrealizować żądany cel i zakres sterowania.

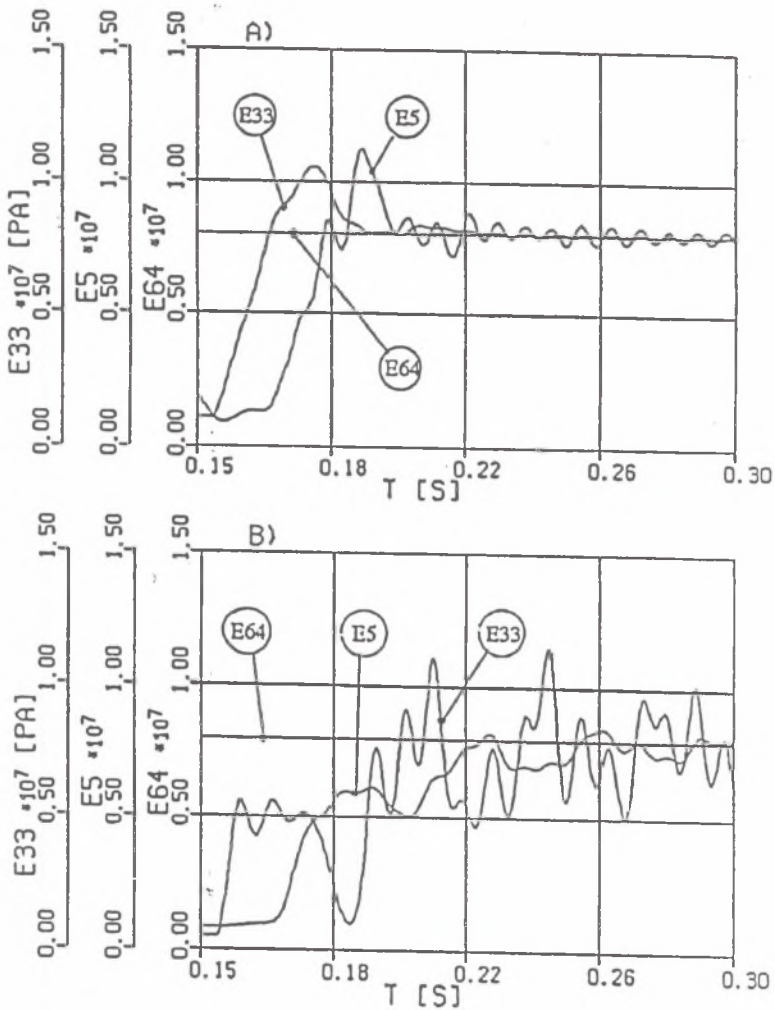


Rys. 2. Graf więzów układu hydraulicznego
Fig. 2. Power bond model of hydraulic system



Rys. 3. Przebiegi czasowe ciśnienia E_{33} oraz E_{64} dla różnych objętości akumulatora V_{ak} przy jego usytuowaniu bezpośrednio przed rozdzielaczem; rys.: a) $V_{ak} = 0$, b) $V_{ak} = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$, c) $V_{ak} = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$, d) $V_{ak} = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$

Fig. 3. Pressure E_{33} and E_{64} versus time by the different capacity of accumulator



Rys. 4. Przebiegi czasowe ciśnienia E_{33} , E_5 , E_{64} dla różnych usytuowań akumulatora o objętości $V_{ak} = 1.2 \cdot 10^{-3}$ [m³]; rys.: a) akumulator zainstalowany bezpośrednio przed rozdzielaczem, b) akumulator zainstalowany za pompą

Fig. 4. Pressure E_{33} , E_5 , E_{64} versus time by the different point of instalation of accumulator

LITERATURA

- [1] Garbacik A.: Modelowanie hydraulicznych układów napędowych maszyn roboczych. Politechnika Krakowska, Monografia 155, Kraków 1993,
- [2] Garbacik A., Cichocki W.: Zastosowanie grafów więzów do modelowania elementów i układów hydraulicznych. Mat. Konf. pt.: "Sterowanie i napędy hydrauliczne - 93", Wrocław 1993,
- [3] Garbacik A., Lisowski E., Szewczyk K.: Akumulator hydrauliczny jako tłumik pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych. Sterowanie i Napęd Hydrauliczny nr 4, 1986,
- [4] Kollek W., Kudźma Z.: Tłumiki pulsacji ciśnienia jako filtry akustyczne w układach hydraulicznych. Sterowanie i Napęd Hydrauliczny nr 6, 1991,
- [5] Stecki J.S.: Hydraulic System Analysis - Power Flow Modelling Technoques. The BFPR, Journal, Austria 1981,
- [6] Wojnarowski J.: Graphs & Mechanics - First International Conference. Poland 1993,
- [7] Grabowiecki K. i inni: Pakiet wspomagania modelowania i analizy układów dynamicznych "UNIPROG".PIMB, Warszawa 1992.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Wojnarowski

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

Abstract

In the hydraulic system, when switching time of the valve is short, a surge wave is generated and it damages the equipment. How to keep transient pressure a tolerable limit is the key for maintaining the proper functioning and fine dynamic performance of an hydraulic system. The authors investigated the method of surge absorption by means of accumulators. This paper discusses bond-graph methods and dynamic test approaches for the study of pressure transients in hydraulic power system. The paper goes on to demonstrate the application of these techniques with an actual example of control systems of the earth - moving machines. A comprehensive model, by bond-graph notation, is set up for hydraulic pipelines supplying hydraulic systems, in which the dynamic behaviour of pump, motor, pressure - control valves, flow - control valves, accumulator is integrated, including the interaction with the system itself. Formulated algorithm of discrete analyses of hydraulic system, with using bond-graph, allowed to analyse its dynamic properties such as: wave propagation, pulsation, surge absorption by accumulator, etc.- including system or external load nonlinearities. This method is useful to determine the influence of element position in the system structure, on dynamic properties of the system.