

KONFERENCJA: MODELOWANIE GÓRNICZYCH MASZYN WYCIĄGOWYCH
9-10.XII.1977JÓZEF WOJNAROWSKI, JERZY ŚWIDER
INSTYTUT PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICEWZNIACZANIE FUNKCJI PODATNOŚCI DYNAMICZNEJ GÓRNICZEJ
MASZINY WYCIĄGOWEJ METODĄ GRAFÓW

W pracy, wykorzystując grafy biegunowe pierwszej kategorii oraz macierzowe grafy przepływu sygnałów, wyznaczono funkcje podatności dynamicznej górniczej maszyny wyciągowej. Uzyskane z maszyny cyfrowej WANG wyniki dostarczyły informacji o własnościach dynamicznych analizowanego układu.

1. Wstęp

Konstruowanie górniczych maszyn wyciągowych wymaga, już na etapie projektowania, dokonywania wstępnej weryfikacji ich własności dynamicznych. Do tego celu potrzebne są algorytmiczne metody budowania wygodnych do symulacji modeli projektowanych układów. W przypadku zastąpienia układu wyciągowego dyskretnym modelem drgającym o wielu stopniach swobody, powszechnie stosowane modele matematyczne, w postaci równań różniczkowych ruchu [4], nie spełniają wyżej wymienionych warunków.

Wprowadzanie zmian parametrów układu, celem poszukiwania optymalnego rozwiązania, wymaga wtedy zmiany modelu matematycznego, co utrudnia algorytmizację i automatyzację obliczeń.

Jako pierwszą propozycję zastosowania niekonwencjonalnej metody grafów do analizy układu wyciągowego uznać można rozdział 7 w pracy [2].

Rozległych podstaw teoretycznych do analizy i syntezy złożonych układów mechanicznych¹⁾ metodami grafów i liczb strukturalnych dostarcza wydana w 1977 r. monografia [7]. Prezentowane w [7] me-

1) W tym także górniczych maszyn wyciągowych.

tody pozwalają na:

- opuszczenie etapu opisywania układu różniczkowymi równaniami ruchu,
- algorytmizację i automatyzację obliczeń drgających układów mechanicznych,
- prowadzenie syntezy w sposób ogólny.

Posługując się metodami modelowania zawartymi w [7] autorzy przedstawili w pracy [5] sposób wyznaczania podatności dynamicznej złożonych układów mechanicznych, wykorzystujący pewną specyficzną metodę transformacji grafu biegunowego \tilde{X} w macierzowy graf przepływu sygnałów X . Sposób ten nazwano "metodą fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej grafu obciążonego" [5].

W niniejszej pracy, stosując metodę fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej, wyznaczono funkcje podatności dynamicznej, projektowanej dla jednej z kopalń, górniczej maszyny wyciągowej. Obliczenia przeprowadzono - dla przykładu - w jednym charakterystycznym położeniu układu (rys. 1).

2. Wyznaczanie funkcji podatności dynamicznej górniczej maszyny wyciągowej

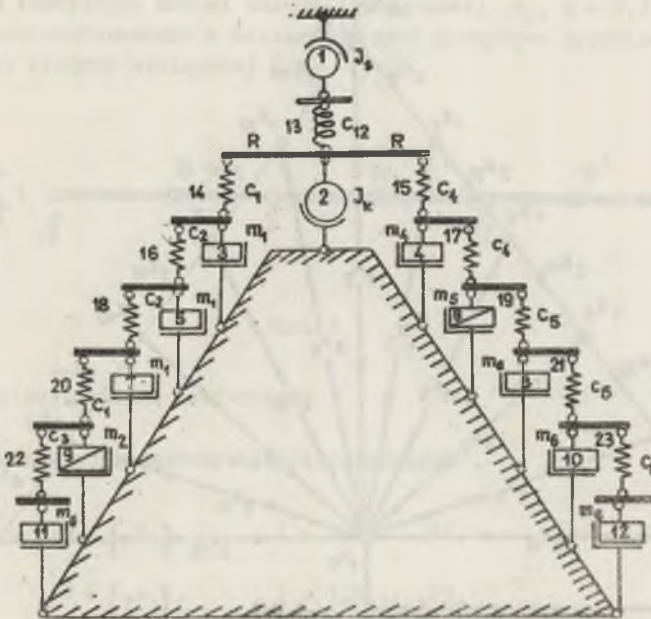
Rozważymy górniczą maszynę wyciągową [2], której model przedstawiono na rys. 1.

W modelu tym wyodrębniono: wirnik silnika maszyny wyciągowej (1), koło pędne (2), elementy masy dyskretnego modelu lewej linii (3, 5, 7), element masy dyskretnego modelu prawej linii (4), lewe naczynie wydobywcze (9), prawe naczynie wydobywcze z ładunkiem (6), element masy dyskretnego modelu lewej części linii wyrównawczej (11), elementy masy dyskretnego modelu prawej części linii wyrównawczej (8, 10, 12), promień koła pędnego (R), sztywność skrętną wału pędnego (13), sztywności wzdłużne dyskretnego modelu lewej linii (14, 16, 18, 20), sztywności wzdłużne dyskretnego modelu prawej linii (15, 17), sztywność wzdłużną dyskretnego modelu lewej części linii wyrównawczej (22), sztywności wzdłużne dyskretnego modelu prawej części linii wyrównawczej (19, 21, 23).

Do wyznaczenia funkcji podatności dynamicznej między silnikiem, a lewym i prawym naczyniem wydobywczym, przyjęto następujące parametry układu:

$$\begin{aligned}
 J_g &= 5,3 \cdot 10^{-3} [\text{MNms}^2], & C_{12} &= 500 [\text{MNm}(\text{rd})^{-1}], & J_k &= 5,2 \cdot 10^{-2} [\text{MNms}^2], \\
 b_1 &= 2,2 [\text{MNm}^{-1}], & C_2 &= 1,1 [\text{MNm}^{-1}], & C_3 &= 1,16 [\text{MNm}^{-1}], & C_4 &= 3,2 [\text{MNm}^{-1}], \\
 C_5 &= 0,72 [\text{MNm}^{-1}], & m_1 &= 5,55 \cdot 10^{-3} [\text{MNs}^2\text{m}^{-1}], & m_2 &= 19,2 \cdot 10^{-3} [\text{MNs}^2\text{m}^{-1}], \\
 m_3 &= 1,1 \cdot 10^{-3} [\text{MNs}^2\text{m}^{-1}], & m_4 &= 3,8 \cdot 10^{-3} [\text{MNs}^2\text{m}^{-1}],
 \end{aligned}$$

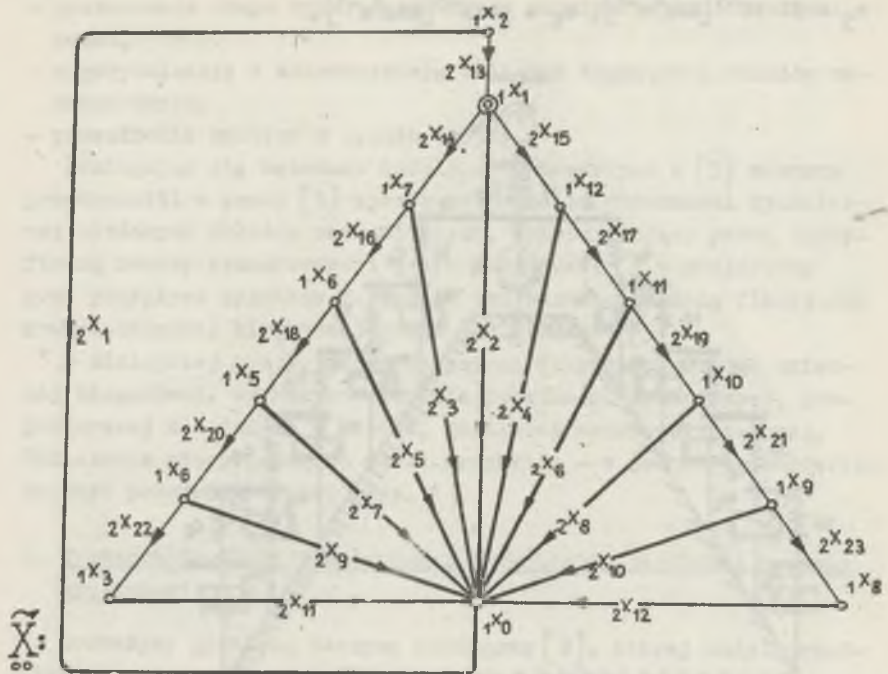
$$m_5 = 32 \cdot 10^{-3} [\text{MNs}^2 \text{m}^{-1}], \quad m_6 = 5 \cdot 10^{-3} [\text{MNs}^2 \text{m}^{-1}].$$



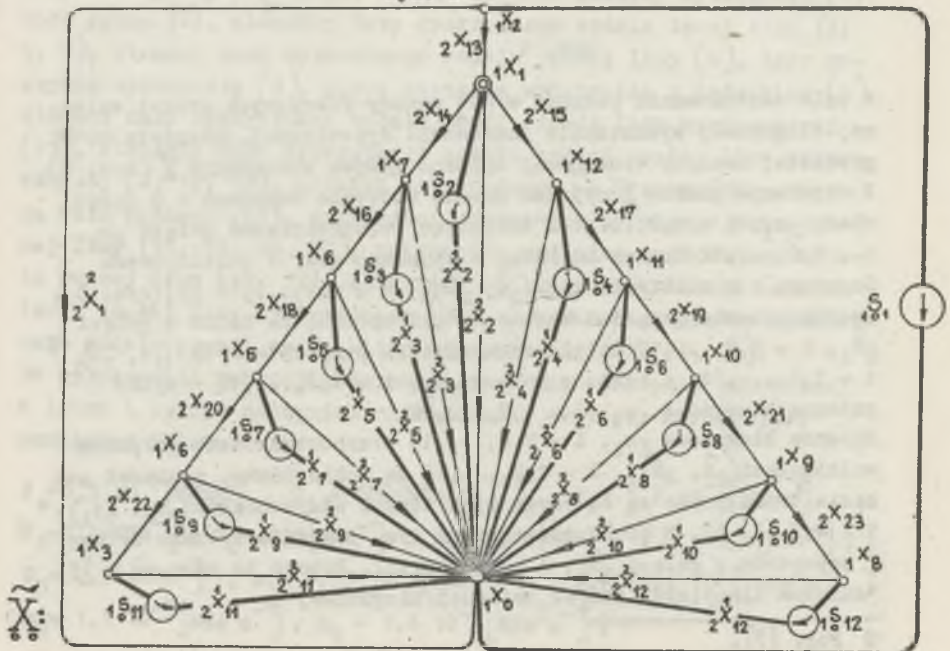
Rys. 1

W celu zastosowania podanej w [5] metody fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej wyznaczania podatności dynamicznej, przyjęty model górniczej maszyny wyciągowej opisano grafem obciążonym \mathcal{G} (rys. 2). W uzyskanym grafie \mathcal{G} wybrano drzewo tworzące Lagrange'a o gałęziach $2x_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Dokonując rozszczepienia gałęzi $2x_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$ drzewa Lagrange'a uzyskano graf z multidrzewem Lagrange'a o multigałęziach $(2x_1, 2x_2)_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$ [5] (rys. 3). Rozszczepienia gałęzi dokonano w taki sposób, że każda z gałęzi $2x_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$ multidrzewa zawiera parę zmiennych $(1s, 2s)_1$ $i = 1, 2, \dots, 12$, a każda z gałęzi $2x_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$ - tylko zmienną biegunową $1s_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Zmienne biegunowe $1s_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$ przyporządkowane gałęziom multigałęzi $(2x_1, 2x_2)_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$ są sobie równe, ponieważ gałęzie te rozpięte są na parze tych samych wierzchołków $(1x_0, 1s_1)$, $i = 1, 2, \dots, 12$. W przedstawionym na rys. 3 grafie wybrano drzewo \mathcal{F} utworzone z gałęzi $2x_1$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Drzewo to nazwano w [5] "drzewem fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej".

1) Por. [7].

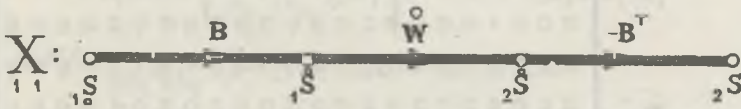


Rys. 2



Rys. 3

Zgodnie z procedurą podaną w [1] uzyskany graf obciążony \mathcal{G} z drzewem fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej $1s_i$, $i = 1, 2, \dots, 12$ przetransformowano w macierzowy graf przepływu sygnałów \mathcal{X} górniczej maszyny wyciągowej (rys. 4)



Rys. 4

z opisującymi go macierzami:

- zmiennych biegunowych i przepływowych

$$1s_i = [1s_i], \quad i = 1, 2, \dots, 12,$$

$$1s_j = [1s_j], \quad j = 1, 2, \dots, 23,$$

$$2s_j = [2s_j], \quad j = 1, 2, \dots, 23,$$

$$2s_i = [2s_i], \quad i = 1, 2, \dots, 12,$$

- sztywności dynamicznych

$$\mathbb{W} = \text{DIAG} \begin{bmatrix} 0,0053p^2, & 0,052p^2, & 0,00555p^2, & 0,0036p^2, \\ 0,00555p^2, & 0,032p^2, & 0,00555p^2, & 0,0053p^2, \\ 0,0192p^2, & 0,0053p^2, & 0,0011p^2, & 0,0053p^2, \\ 500, & 2,2, & 3,2, & 1,1, & 3,2, & 1,1, & 0,72, & 2,2, \\ 0,72, & 1,16, & 0,72 \end{bmatrix}$$

Z rys. 5 wynika bezpośrednio, że transmitancja uzyskanego łuku $\mathbf{Y}(p) = [\mathbf{B} \cdot \mathbf{K} \cdot (-\mathbf{B}^T)]^{-1}$ jest macierzą operatorowych podatności dynamicznych modelu górniczej maszyny wyciągowej.

Dla $p = j\omega$, gdzie $j = \sqrt{-1}$, macierz operatorowa $\mathbf{Y}(p)$ staje się macierzą podatności dynamicznych układu wyciągowego [7,3].

Wtedy

$$\mathbf{Y}(j\omega) = \left[{}_2s_1 Y_{1s_k}(j\omega) \right], \quad i, k = 1, 2, \dots, 12,$$

gdzie ${}_2s_1 Y_{1s_k}(j\omega)$, $i, k = 1, 2, \dots, 12$

oznacza podatność dynamiczną układu wyciągowego między i -tą zmienną przepływową (wzbudzenie układu), a k -tą zmienną biegunową (odpowieź układu).

Macierz $\mathbf{Y}(j\omega)$ podatności dynamicznych górniczej maszyny wyciągowej, uzyskana metodą fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej, jest macierzą kwadratową o wymiarze $n \times n$, gdzie n jest liczbą stopni swobody przyjętego modelu układu.

Liczba kolumn tej macierzy jest równa liczbie elementów w wierszu odpowiedzi układu, a liczba wierszy - liczbie elementów w wierszu wzbudzenia układu [5].

Wyrażenie

$${}_2s_1 Y_{1s_k}(j\omega), \quad i, k = 1, 2, \dots, 12$$

jest więc elementem macierzy $\mathbf{Y}(j\omega)$, leżącym w i -tym wierszu k -tej kolumny.

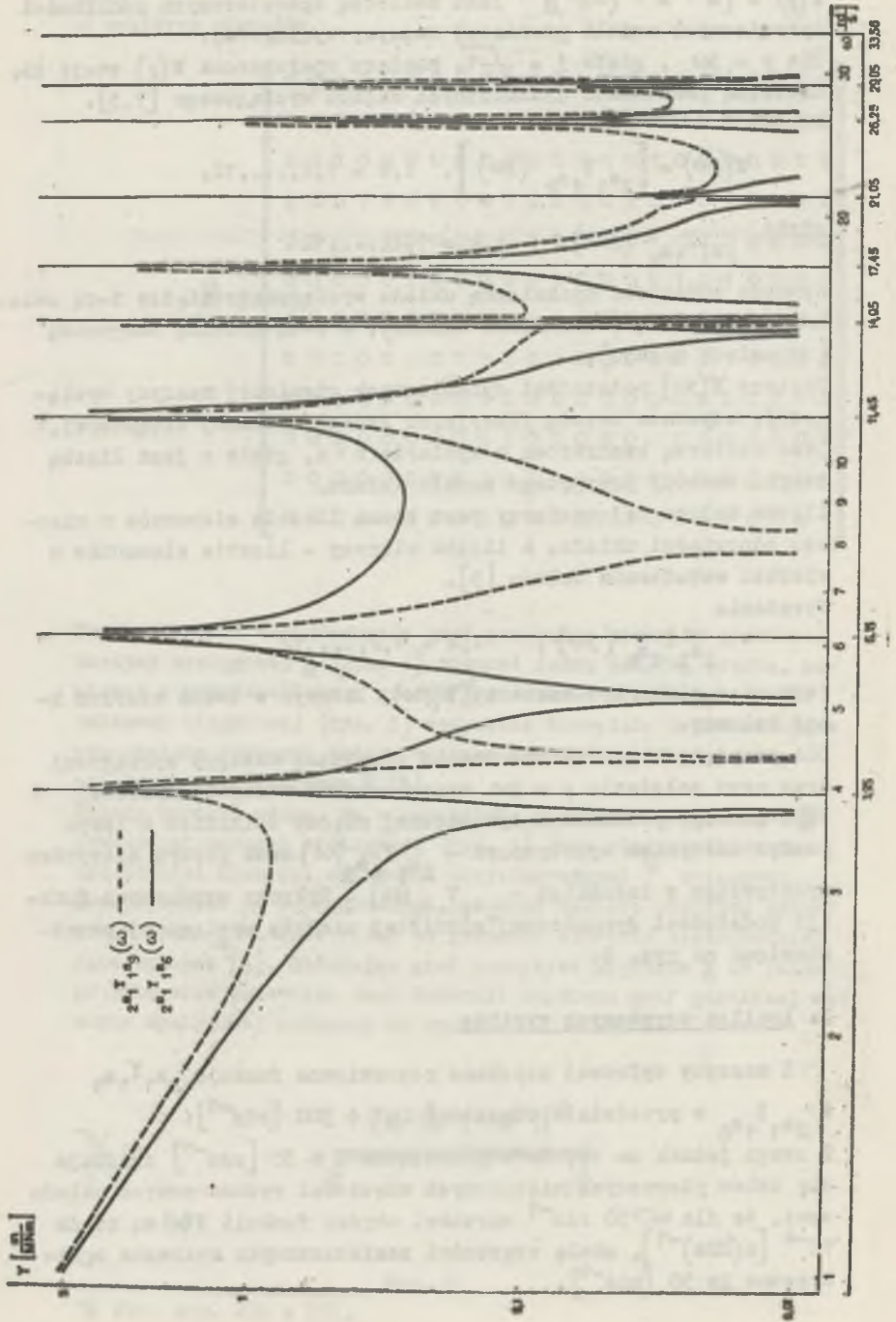
Dla przyjętych parametrów modelu górniczej maszyny wyciągowej oraz przy założeniu $p = j\omega$ wyznaczono na maszynie cyfrowej WANG funkcje podatności dynamicznej między silnikiem a lewym pustym naczyniem wydobywczym - ${}_2s_1 Y_{1s_9}(\omega)$ oraz prawym naczyniem wydobywczym z ładunkiem - ${}_2s_1 Y_{1s_6}(\omega)$. Wykresy uzyskanych funkcji podatności dynamicznej górniczej maszyny wyciągowej przedstawiono na rys. 6.

3. Analiza uzyskanych wyników

Z maszyny cyfrowej uzyskano poszukiwane funkcje ${}_2s_1 Y_{1s_9}$

i ${}_2s_1 Y_{1s_6}$ w przedziale częstości $0,1 \div 500$ [rds⁻¹].

Z uwagi jednak na to, że w przedziale $0 \div 30$ [rds⁻¹] znajduje się osiem pierwszych niezerowych częstości rezonansowych układu oraz, że dla $\omega > 30$ rds⁻¹ wartości obydwu funkcji $Y(\omega)$ są rzędu 10^{-4} [m(MNm)⁻¹], skalę częstości zamieszczonych wykresów ograniczono do 30 [rds⁻¹].



Uzyskane funkcje podatności dynamicznych górniczej maszyny wyciągowej dostarczyły informacji o:

- częstościach drgań własnych i szerokościach pasm rezonansowych,
- wartościach liczbowych podatności dynamicznych między silnikiem maszyny wyciągowej, a lewym pustym naczyniem wydobywczym w skrajnym dolnym jego położeniu (linia przerywana na rys. 6) oraz prawym naczyniem wydobywczym z ładunkiem w skrajnym górnym jego położeniu (linia ciągła na rys. 6).

W szczególności dla analizowanego położenia górniczej maszyny wyciągowej (rys. 1) uzyskano następujące niezerowe częstości drgań własnych: 3,95, 6,15, 11,45, 14,95, 17,45, 21,05, 26,25, 29,05, 33,55, 43,55, 322,55 [rds⁻¹].

Niepokojącym jest fakt szerokiej strefy rezonansowej naczynia wydobywczego z ładunkiem w górnym położeniu, w zakresie od 5 do 12 [rds⁻¹]. Średni poziom podatności dynamicznej w tym zakresie osiąga wartość około 0,4 [m (MNm)⁻¹]. Szeroka strefa rezonansowa dla pustego naczynia wydobywczego w dolnym położeniu, o średnim poziomie podatności dynamicznej około 0,2 [m (MNm)⁻¹] leży w przedziale 11 ÷ 18 [rds⁻¹].

Poza zakresem 30 [rds⁻¹] poziom podatności dynamicznej analizowanego układu gwałtownie maleje, osiągając wraz ze wzrostem częstości wzbudzenia wartości znaczenia mniejsze od 10⁻⁴ [m (MNm)⁻¹].

4. Wnioski

Zastosowanie grafów w modelowaniu górniczych maszyn wyciągowych pozwala na opracowanie prostych, możliwych do zalgorytmizowania i zautomatyzowania, metod obliczania charakterystyk dynamicznych [2, 5, 6, 7].

Przedstawiona w [5] metoda fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej grafu obciążonego pozwoliła opracować wygodny w użyciu program wyznaczania podatności dynamicznej między dowolnie wybranymi węzłami układu górniczej maszyny wyciągowej.

Zaprezentowany sposób wyznaczania podatności może być stosowany przez inżynierów w specjalistycznych biurach projektowych do weryfikacji własności dynamicznych konstruowanych układów wyciągowych. Sposób ten charakteryzuje:

- 1^o Pominiecie etapu sporządzania modelu matematycznego w formie równań różniczkowych ruchu.
- 2^o Prosta postać macierzowego grafu przepływu sygnałów przedstawiającego relacje między zmiennymi przepływowymi wzbudzenia, a zmiennymi biegunowymi odpowiedzi układu.

- 3^o Łatwość wprowadzania zmian do programu obliczeń maszyny cyfrowej przy modyfikacji parametrów układu.
- 4^o Szybkie uzyskiwanie wyników numerycznych stanowiących elementy macierzy podatności.

LITERATURA

- [1] J.S.Mason, H.J. Zimmermann: *Elektronic Circuits, Signal and Systems*. John Wiley & Sons INC 1960, New York - London.
- [2] Praca zbiorowa pod red. J.Wojnarowskiego: *Pewne problemy modelowania wieloliniowych układów wyciągowych*, Gliwice 1976.
- [3] V.Strejc, M.Salamon, Z.Kotek, M.Balda: *Teoria regulacji automatycznej*. WNT - Warszawa 1962 tłum. książki: V. Strejc, M.Salamon, Z.Kotek, M.Balda: *Zakłady teorie samocinne regulace*, Statni Nakladatelstivi Technicke Literatury, Praha 1958 .
- [4] L. Szklarski, A. Skalny: *Teoretyczne zagadnienia maszyn wyciągowych*. Polska Akademia Nauk, Komitet Elektrotechniki, PWN Warszawa 1975.
- [5] J. Świder, J.Wojnarowski: *Metoda fikcyjnych źródeł zmiennej biegunowej jako sposób wyznaczania podatności dynamicznej złożonych układów mechanicznych oddano do druku .*
- [6] J.Świder, J.Wojnarowski: *Grafy przepływu sygnałów w modelowaniu kaskadowej struktury układu wyciągowego*. XVI Sympozjon "Modelowanie w Mechanice". PTMTS Oddział Gliwice, Beskid Śląski - marzec 1977 .
- [7] J.Wojnarowski: *Grafy i liczby strukturalne jako modele układów mechanicznych*. Politechnika Śląska - PTMTS Oddz. Gliwice, z 38, Gliwice 1977.

OBTAINING DYNAMICAL FLEXIBILITY FUNCTION OF MINING HOISTING MACHINE BY GRAPHS METHOD

In this paper using pole graphs first category and matrix signal flow graphs dynamical flexibility function of mining hoisting machine was determinated. Results with computer WANG have been obtain, gived informations about dinamic properties of system, analysis was presented.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОДАТЛИВОСТИ ГОРНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ МЕТОДОМ ГРАФОВ

В работе, используя полюсные графы первой категории и матричные графы сигналов, определено функции динамической податливости горной подъемной машины. Получены из ЦВМ ВАНГ результаты доставили информации об динамических свойствах анализированной системы.