

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW  
MERA-PIAP

Al. Jerozolimskie 202

02-222 Warszawa

Telefon 23-70-81

440

OSRODEK AUTOMATYKI ELEKTRYCZNEJ

BE 10

ZESPOŁ BUDOWY ROBOTÓW I SERWOMECHANIZMÓW

Główny wykonawca mgr inż. Marian Wrzesień

Wykonawcy mgr inż. Stefan Frydliński

Konsultant

Nr zlecenia 9348

Analiza procesu sterowania ciągnika  
gąsienicowego sterowanego laserem.  
Etap 4. Badania symulacyjne ciągnika  
gąsienicowego sterowanego laserem.

Zlecniodawca

Praca własna MERA-PIAP

Pracę rozpoczęto dnia 1.01.83

zakończono dnia 31.12.83

Kierownik Zespołu

p.o.dyr. d/s Automatyki

Kierownik Ośrodka

dr inż. P. Jabłoński

prof. dr inż. T. Missala

dr inż. T. Gałazka

Praca zawiera:

Rozdzielnik - ilość egz:

stron 31

Egz. 1

BOINTE

rysunków 12

Egz. 2

OAE

fotografii -

Egz. 3

tabel -

Egz. 4

tablic 4

Egz. 5

załączników 2

Egz. 6

Nr rejestr. 5168

**Analiza dokumentacyjna**

Sprawozdanie zawiera opis symulacji komputerowej ciągnika gąsienicowego wyposażonego w lemiesz - sterowanego laserem.

**Tytuły poprzednich sprawozdań**

- Etap 1. Analiza układu regulacji ciągnika TD-25c sterowanego z wykorzystaniem laserowego urządzenia UL-4. Nr rej. 4517.
- Etap 2. Sprawdzenie i zweryfikowanie modelu matematycznego układu sterowania zaprogramowanego w etapie 1 Nr rej. 4750.
- Etap 3. Zamodelowanie układu regulacji ciągnika gąsienicowego sterowanego urządzeniem laserowym. Zaprogramowanie modelu w języku CSMP. Nr rej. 4945.

62-50 Teoria i podstawy techniki regulacji i sterowania.

## Spis treści

	Strona
1. Wstęp	2
2. Badania symulacyjne układu elektrohydraulicznego	2
3. Model zastępczy układu elektrohydraulicznego	3
3.1. Założenia przy budowie modelu	3
3.2. Badania symulacyjne	5
3.2.1. Założenia	6
3.3. Wyniki badań symulacyjnych	9
3.4. Postać analityczna modelu zastępczego	12
3.5. Wnioski	15
4. Model matematyczny	15
4.1. Wstęp	15
4.2. Zależności kinematyczne	18
4.2.1. Nierówności wytwarzane przez lemiesz ciągnika	19
4.3. Przejazd ciągnika przez nierówności	21
4.3.1. Ustępowanie gruntu	23
4.4. Zależności dynamiczne	25
4.5. Układ regulacji automatycznej	27
5. Badania symulacyjne	28
5.1. Wyniki badań	29
6. Wnioski	30
7. Rysunki	32
8. Literatura	45
9. Załączniki	46

## 1. W S T Ę P

Zgodnie z wnioskami zawartymi w sprawozdaniu z poprzedniego etapu pracy ( sprawozdanie nr. rej. 4945), w niniejszej pracy zostaną omówione następujące zagadnienia:

- i/ Przystosowanie opracowanego modelu układu elektrohydraulicznego przy modelowaniu układu regulacji położenia lemiesza ciągnika w ruchu.
- ii/ Zweryfikowanie i korekta opracowanego modelu ciągnika gąsienicowego w ruchu.
- iii/ Przeprowadzenie badań symulacyjnych układu regulacji automatycznej położenia lemiesza ciągnika.

Ponadto w pracy przedstawiono program symulacyjny wcześniej opracowanego modelu układu elektrohydraulicznego oraz przebiegi niektórych wielkości występujących w układzie sterowania otrzymane w oparciu o badania symulacyjne tego modelu.

## 2. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU ELEKTROHYDRAULICZNEGO

Dotychczasowe rozważania umożliwiły zbudowanie programu symulacyjnego na podstawie modelu matematycznego elektrohydraulicznego układu sterującego ciężkiej maszyny roboczej. Program symulacyjny - w języku CSMP - przedstawia załącznik 1. Uwzględniono w nim zjawiska dynamiczne zachodzące w przetworniku elektromechanicznym, rozdzielaczu oraz w siłownikach hydraulicznych,

a w szczególności procesy zmian:

- położenia nura i tłoczka elektromagnesu  $x_1(t)$
  - prądu płynącego w cewce elektromagnesu  $i(t)$
  - siły elektrodynamicznej  $F_{ed}(t)$
  - ciśnień  $P_a(t)$ ,  $P_b(t)$  w komorach suwaka rozdzielacza
  - przepływów  $Q_a(t)$ ,  $Q_b(t)$  do/z komór suwaka rozdzielacza
  - położenia suwaka rozdzielacza  $x_2(t)$
  - ciśnień  $P_{tm}(t)$ ,  $P_{td}(t)$  w komorach siłowników.
  - przepływów  $Q_m(t)$ ,  $Q_d(t)$  do/z komór siłowników
  - położenia  $x_3(t)$  tłoczysk siłowników
  - przepływu zlewowego  $Q_z(t)$
  - przepływu zwrotnego  $Q_t(t)$
- i inne.

W oparciu o program symulacyjny układu elektrohydraulicznego przeprowadzono badania, których celem było dokonanie oceny zgodności przebiegów otrzymanych w czasie symulacji z przebiegami rzeczywistymi.

Podczas badań przyjęto wymuszenie w postaci pięciu impulsów sterujących o czasie trwania  $t_i = 0,11$  s i czasie powtarzania  $t_{po} = 0,2$  s. Impulsy o wartości  $U = 24V$  są podawane kolejno: dwa na elektromagnes A, dwa na elektromagnes B i jeden na elektromagnes A. Przyjęto stałą wartość wydatku pompy  $Q_{00} = 1,46 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s. W celu zbadania wpływu siły  $F_t$  na działanie układu ustalono, że siła  $F_t = 2,5 \cdot 10^4$  N pojawia się

skokowo w czasie  $t = 0,6$  s.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano wydruki, na podstawie których sporządzono wykresy przebiegów:

$p_a(t)$  ,  $p_b(t)$  ,  $Q_b(t)$  ,  $x_2(t)$  ,  $x_3(t)$  ,  $Q_d(t)$  ,  
 $Q_m(t)$  ,  $p_{tm}(t)$  ,  $p_{td}(t)$  ,  $Q_z(t)$  ,  $Q_t(t)$   
(rys. 1, ... rys. 6) .

Przyjmuje się, że dowodem zbieżności modelu z układem rzeczywistym są, jakościowo zgodne przebiegi  $x_2(t)$  i  $x_3(t)$  , modelu i układu rzeczywistego.

### 3. MODEL ZASTĘPCZY UKŁADU ELEKTROHYDRAULICZNEGO

#### 3.1. Założenia przy budowie modelu.

W sprawozdaniu nr rej. 4945 przedstawiono model typu fenomenologicznego układu elektrohydraulicznego. Zastosowanie takiego modelu przy modelowaniu układu regulacji położenia narzędzia roboczego ciągnika w ruchu byłoby niemożliwe ze względu na zbyt długi czas wymagany do przeprowadzenia obliczeń przy użyciu EMC. Przykładowo, czas potrzebny do symulacji poruszającego się przez 60 s ciągnika wyniósłby ok. 15 godzin. W celu wykorzystania opracowanego modelu do badań symulacyjnych ciągnika, zbudowano - na jego podstawie - model zagregowany typu "czarna skrzynka", który

uwzględnia wielkości istotne jedynie z punktu widzenia zastosowania go w układzie regulacji ciągnika. Model ten zastępuje wcześniej omówiony model szczegółowy.

W modelu zastępczym /rys. 7 / wymuszenie stanowi impuls napięciowy  $U_z$ , sterujący elektromagnesami rozdzielacza elektrohydraulicznego; wydatek pompy  $Q_{00}$  oraz czas trwania  $T_i$  impulsu sterującego są traktowane jako parametry, natomiast siła  $F_t$  jest zakłóceniem w procesie sterowania położeniem tłoczysk siłowników.

Przyjęto, że model zastępczy będzie opisany funkcją schodkową o postaci:

$$x_{3II} = x_{3I} + \Delta x_3 \quad (1)$$

$$x_3 = \begin{cases} f(T_i, Q_{00}, F_t, U_z) & \text{dla } t = k \cdot T_{po} \quad k = 1, 2, 3, \dots \\ 0 & \text{dla } t \neq k \cdot T_{po} \end{cases} \quad (2)$$

przy czym,

$\Delta x_3$  - zmiana położenia tłoczyska siłownika

$x_{3II}$  - położenie tłoczyska siłownika po k-tym przyroście  $\Delta x_3$

$x_{3I}$  - położenie tłoczyska siłownika przed k-tym przyrostem  $\Delta x_3$ .

Z założenia tego wynika, że w modelu uproszczonym pomija się stany przejściowe przebiegu zmian położenia

tłoczek siłowników.

Przedstawione wyżej założenia upraszczające są uzasadnione przyjętym sposobem modelowania nierówności wytwarzanych przez lemiesz /rozdz.4/. Nierówności te są opisane zbiorem punktów  $x_{1i}$ ,  $y_{1i}$  rejestrowanych w momentach czasowych odpowiadających zmianom położenia lemiesza w poziomie o stałą wartość  $\Delta x_L \sim 17 \text{ cm}$ . Przy prędkości jazdy ciągnika 1 km/godz. /średnia prędkość robocza przy zastosowaniu URA/, czas pomiędzy kolejnymi odczytami współrzędnych punktów  $x_{1i}$ ,  $y_{1i}$  jest około dziesięciokrotnie dłuższy od czasu trwania stanów przejściowych przebiegu  $x_3 = f(t)$ .

Zakłada się ponadto, że przebieg  $x_3 = f(t)$ , pomiędzy stanami ustalonymi, jest liniowy. Założenie to wynika z pominięcia stanów przejściowych przy przełączaniu rozdzielacza i przyjęcia liniowej zależności pomiędzy przepływem a prędkością ruchu tłoczyska.

### 3.2. Badania symulacyjne

Celem uzyskania modelu typu "czarna skrzynka", przedstawionego zależnościami (1), (2), przeprowadzono - w oparciu o model układu elektrohydraulicznego - badania symulacyjne. Badania te stanowiły eksperyment, którego efektem było uzyskanie zależności:

$$x_3 = f(T_i, Q_{00}, F_t, U_z) \quad (3)$$



która uwzględnia wpływ sterowania ( $U_z, T_i$ ) oraz wydatku pompy i siły obciążającej lemiesz ( $Q_{oo}, F_t$ ) na przyrost wysunięcia tłoczysk siłowników.

Zależność (3) umożliwia określenie położenia tłoczysk siłowników z pominięciem analizy zjawisk zachodzących w pozostałych elementach układu takich jak: przetwornik elektromechaniczny i rozdzielacz elektrohydrauliczny.

Podstawą przyjęcia modelu układu elektrohydraulicznego jako bazy przy eksperymencie było wcześniejsze stwierdzenie adekwatności tego modelu.

### 3.2.1. Założenia

- i/ Badania symulacyjne przeprowadza się wykorzystując pełny model układu elektrohydraulicznego (sprawozdanie nr 4945).
- ii/ W celu znalezienia ogólnych zależności na przyrosty położenia tłoczyska  $\Delta x_3$  ustalono, że parametry  $Q_{oo}$  oraz  $F_t$  będą przyjmowały następujące wartości;

$$Q_{oo1} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad Q_{oo2} = 2,67 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}},$$

$$Q_{oo3} = 3,34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad F_{t1} = 0 \text{ N}$$

$$F_{t2} = 5 \cdot 10^4 \text{ N}, \quad F_{t3} = 10^5 \text{ N}$$

Wartości wydatku  $Q_{00}$  przyjęto w oparciu o przewidywania dotyczące typu pompy, która zostanie zastosowana w układzie hydraulicznym, wartości siły  $F_t$  przyjęto na podstawie oszacowania obciążenia lemiesza ziemią w czasie pracy ciągnika. Ocenę tę przeprowadzono w czasie prób poligonowych ciągnika.

iii/Ze względu na konieczność wyznaczania przyrostów  $\Delta x_3$  przy sterowaniu elektromagnesu A /  $U_z = U_z A$ , lemiesz podnoszony/ oraz elektromagnesu B /  $U_z = U_z B$ , lemiesz opuszczany/, podane zostaną dwa impulsy sterujące  $J_{sa}$ ,  $J_{sb}$  kolejno <sup>na</sup> elektromagnes A, a następnie B /rys.8/.

Na podstawie przebiegów wymuszonych tymi impulsami zostaną wyznaczone wartości przyrostów  $\Delta x_3$ .

iv/ Przyjęto czas trwania impulsów sterujących  $t_i = t_{i0} = 0,11s$ . Jest to minimalny czas, przy którym można zarejestrować pełne przebiegi zjawisk dynamicznych.

v/ Za wartość początkową położenia tłoczyska  $x_{30}$  przyjęto  $x_3 = 10^{-1}m$ . Impulsy sterujące  $I_{sa}$  i  $I_{sb}$  będą powodowały zmianę położenia siłowników wokół tej wartości.

Położenie  $x_{30}$  ustalono na podstawie wstępnych badań symulacyjnych układu regulacji ciągnika, z których wynika, że wysunięcie siłownika zmienia się w czasie ruchu ciągnika wokół tej wartości.

vi/ Brak możliwości ustalenia warunków początkowych innych wielkości występujących w układzie rzeczywistym /pok, pzk, pA, pB, ptm, ptd/ był przyczyną wprowadzenie impulsu ustawiającego  $I_u$  - przed impulsami sterującymi  $I_{sa}$  i  $I_{sb}$  /rys. 8/.

vii/ Przyjęto następujące warunki początkowe dla impulsu ustawiającego  $I_u$ :

$$x_{30} = 9,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$p_{td0} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$9,826 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{dla } F_t = 0 \text{ N}$$

$$p_{tm0} = 3,306 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{dla } F_t = 5 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$5,629 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{dla } F_t = 10^5 \text{ N}$$

viii/ Impuls ustawiający kończy się w czasie  $t = t_1$ ,  
gdy położenie tłoczyska osiąga wartość  $x_3 = 10^{-1} \text{ m}$   
/założenie v/ /.

ix/ Wartość  $p_{td0}$  została przyjęta arbitralnie.

Wartości  $p_{tm0}$  wynikają z równowagi sił działających na siłowniki w stanie ustalonym.

x/ Czas odstępu pomiędzy impulsami  $t_{od}$  został przyjęty tak, aby zapewnić ustalenie się warunków równowagi po zakończeniu każdego z impulsów /rys.8/.

xi/ Ze względu na określony czas trwania impulsów sterujących  $t_i = t_{i0}$  podczas badań symulacyjnych,

M

wartości przyrostów dla impulsów o czasie trwania  $t_i \geq t_{imin}$  będą przedstawione zależnościami;

$$\Delta x_{3plt} = \Delta x_{3pl} + k_{ppl} \cdot (t_i - t_{io}) \text{ dla } U_z = U_A \quad (4)$$

$$\Delta x_{3mit} = \Delta x_{3mi} + k_{pmi} \cdot (t_i - t_{io}) \text{ dla } U_z = U_B \quad (5)$$

przy czym:

$\Delta x_{3pl}$  - przyrost położenia przy wsuwaniu tłoczyska

$\Delta x_{3mi}$  - przyrost położenia przy wysuwaniu tłoczyska

$k_{ppl}$  - współczynnik nachylenia przebiegu  $x_3 = f(t)$   
przy wsuwaniu tłoczyska

$k_{pmi}$  - współczynnik nachylenia przebiegu  $x_3 = f(t)$   
przy wysuwaniu tłoczyska

$t_{imin} = 0,09s$ . Dla impulsów o czasie trwania  $t_i < t_{imin}$  zależności (4), (5) przestają być prawdziwe

### 3.3. Wyniki badań symulacyjnych.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano wydruki 9 przebiegów ruchu tłoczyska siłownika  $x_3 = f(t)$ , dla każdej pary wartości  $Q_{00}$ ,  $F_t$ . Na podstawie tych wydruków odczytano wartości przyrostów:  $\Delta x_{3pl}$  i  $\Delta x_{3mi}$  oraz wyznaczono wartości współczynników nachylenia  $k_{ppl}$  i  $k_{pmi}$ .

Wartości tych wielkości umieszczono w tabelicy 1 oraz przedstawiono w postaci wykresów /rys.9/, przy czym wielkości odpowiadające sile  $F_t = 0$  indeksowano cyfrą 1, sile  $F_t = 5 \cdot 10^4$  cyfrą 2, a sile  $F_t = 10^5$  cyfrą 3.

Tablica 1

$F_t = 0$				
$Q_{00}$	$\Delta x_{3p11}$	$\Delta x_{3mi1}$	$k_{pp11}$	$k_{pmi1}$
$10^{-3} \frac{m^3}{s}$	$10^{-3} m$	$10^{-3} m$	$10^{-1} \frac{m}{s}$	$10^{-1} \frac{m}{s}$
2,00	6,09	-6,37	1,23	-1,24
2,67	7,98	-8,47	1,49	-1,60
3,34	10,25	-10,95	1,73	-1,91
$F_t = 5 \cdot 10^4$				
$Q_{00}$	$\Delta x_{3p12}$	$\Delta x_{3mi2}$	$k_{pp12}$	$k_{pmi2}$
$10^{-3} \frac{m^3}{s}$	$10^{-3} m$	$10^{-3} m$	$10^{-1} \frac{m}{s}$	$10^{-1} \frac{m}{s}$
2,00	5,19	-11,40	1,17	-1,96
2,67	7,46	-12,30	1,47	-2,08
3,34	9,78	-13,30	1,73	-2,29
$F_t = 10^5$				
$Q_{00}$	$\Delta x_{3p13}$	$\Delta x_{3mi3}$	$k_{pp13}$	$k_{pmi3}$
$10^{-3} \frac{m^3}{s}$	$10^{-3} m$	$10^{-3} m$	$10^{-1} \frac{m}{s}$	$10^{-1} \frac{m}{s}$
2,00	4,74	-1,72	1,17	-2,99
2,67	7,14	-1,75	1,48	-2,80
3,34	9,7	-1,78	1,74	-2,80

Tablica 2

$F_t = 0$					
$\alpha_{xpl1}$	$b_{xpl1}$	$\alpha_{xmi1}$	$b_{xmi1}$	$\alpha_{kpmi1}$	$b_{kpmi1}$
$\frac{s}{m^2}$	m	$\frac{s}{m^2}$	m	$\frac{1}{m^2}$	$\frac{m}{s}$
3,1	$-1,82 \cdot 10^{-4}$	-3,42	$5,29 \cdot 10^{-4}$	-50	$-2,48 \cdot 10^2$
$F_t = 5 \cdot 10^4$					
$\alpha_{xpl2}$	$b_{xpl2}$	$\alpha_{xmi2}$	$b_{xmi2}$	$\alpha_{kpmi2}$	$b_{kpmi2}$
$\frac{s}{m^2}$	m	$\frac{s}{m^2}$	m	$\frac{1}{m^2}$	$\frac{m}{s}$
3,43	$-1,67 \cdot 10^{-3}$	-1,42	$-8,55 \cdot 10^{-3}$	-24,4	$-1,46 \cdot 10^{-1}$
$F_t = 10^5$					
$\alpha_{xpl3}$	$b_{xpl3}$	$\alpha_{xmi3}$	$b_{xmi3}$	$\alpha_{kpmi3}$	$b_{kpmi3}$
$\frac{s}{m^2}$	m	$\frac{s}{m^2}$	m	$\frac{1}{m^2}$	$\frac{m}{s}$
3,7	$-2,69 \cdot 10^{-3}$	$-4,48 \cdot 10^{-1}$	$-1,63 \cdot 10^{-2}$	14,2	$-3,24 \cdot 10^{-1}$

14

### 3.4. Postać analityczna modelu zastępczego

Z wykresów przedstawionych na rys. 9 wynika, że zależności  $\Delta x_{3p1}$ ,  $\Delta x_{3mi}$ ,  $k_{pmi}$  i  $k_{ppl}$  są w przybliżeniu liniowymi funkcjami wydatku  $Q_{00}$  dla każdej wartości siły  $F_t$ . Zależności  $\Delta x_{3p1}$ ,  $\Delta x_{3mi}$ ,  $k_{pmi}$  aproksymowano, stosując metodę najmniejszych kwadratów, funkcjami liniowymi. Otrzymano poniższe grupy zależności:

$$\Delta x_{3p1} = \alpha_{xp1} \cdot Q_{00} + b_{xp1} \quad \text{dla} \quad F_t = 0 \quad (6)$$

$$\Delta x_{3p2} = \alpha_{xp2} \cdot Q_{00} + b_{xp2} \quad \text{dla} \quad F_t = 5 \cdot 10^4 \quad (7)$$

$$\Delta x_{3p3} = \alpha_{xp3} \cdot Q_{00} + b_{xp3} \quad \text{dla} \quad F_t = 10^5 \quad (8)$$

$$\Delta x_{3mi1} = \alpha_{xmi1} \cdot Q_{00} + b_{xmi1} \quad \text{dla} \quad F_t = 0 \quad (9)$$

$$\Delta x_{3mi2} = \alpha_{xmi2} \cdot Q_{00} + b_{xmi2} \quad \text{dla} \quad F_t = 5 \cdot 10^4 \quad (10)$$

$$\Delta x_{3mi3} = \alpha_{xmi3} \cdot Q_{00} + b_{xmi3} \quad \text{dla} \quad F_t = 10^5 \quad (11)$$

$$k_{pmi1} = \alpha_{kpmi1} \cdot Q_{00} + b_{kpmi1} \quad \text{dla} \quad F_t = 0 \quad (12)$$

$$k_{pmi2} = \alpha_{kpmi2} \cdot Q_{00} + b_{kpmi2} \quad \text{dla} \quad F_t = 5 \cdot 10^4 \quad (13)$$

$$k_{pmi3} = \alpha_{kpmi3} \cdot Q_{00} + b_{kpmi3} \quad \text{dla} \quad F_t = 10^5 \quad (14)$$

Wartości  $\alpha_{xp1}$ ,  $b_{xp1}$ ,  $\alpha_{xmi}$ ,  $b_{xmi}$ ,  $k_{pmi}$ ,  $b_{kpmi}$  umieszczono w tabelicy 2.

W celu otrzymania zależności (6), ..., (14) jako funkcji wydatku  $Q_{00}$  i siły  $F_t$ , dla każdej grupy zależności przeprowadzono aproksymację współczynników  $\alpha$  i  $b$  funkcjami kwadratowymi siły  $F_t$ . W wyniku otrzymano:

$$\Delta x_{3pl} = \mathcal{L} x_{pl} \cdot Q_{00} + b_{xpl} \quad (15)$$

$$\Delta x_{3mi} = \mathcal{L} x_{mi} \cdot Q_{00} + b_{xmi} \quad (16)$$

$$\Delta k_{pmi} = \mathcal{L} k_{pmi} \cdot Q_{00} + b_{kpmi} \quad (17)$$

przy czym:

$$\mathcal{L} x_{pl} = a \mathcal{L} x_{pl} \cdot Ft^2 + b \mathcal{L} x_{pl} \cdot Ft + c \mathcal{L} x_{pl} \quad (18)$$

$$b_{xpl} = ab_{xpl} \cdot Ft^2 + bb_{xpl} \cdot Ft + cb_{xpl} \quad (19)$$

$$\mathcal{L} x_{mi} = a \mathcal{L} x_{mi} \cdot Ft^2 + b \mathcal{L} x_{mi} \cdot Ft + c \mathcal{L} x_{mi} \quad (20)$$

$$b_{xmi} = ab_{xmi} \cdot Ft^2 + bb_{xmi} \cdot Ft + cb_{xmi} \quad (21)$$

$$\mathcal{L} k_{pmi} = a \mathcal{L} k_{pmi} \cdot Ft^2 + b \mathcal{L} k_{pmi} \cdot Ft + c \mathcal{L} k_{pmi} \quad (22)$$

$$b_{kpmi} = ab_{kpmi} \cdot Ft^2 + bb_{kpmi} \cdot Ft + cb_{kpmi} \quad (23)$$

Wartości współczynników zależności (18), ..., (23) zamieszczono w tabelicy 3. Przy wyznaczaniu zależności funkcyjnej  $k_{ppl} = f(Q_{00}, Ft)$  /rys.9/ zauważono, że wartości współczynnika  $k_{ppl}$  - przy różnych wartościach siły  $Ft$ , dla każdej z wartości przepływu  $Q_{00}$ , - mało różnią się między sobą. Z tego względu wartości te uśredniono. Otrzymane wartości średnie aproksymowano funkcją liniową przepływu  $Q_{00}$ . W wyniku otrzymano:

$$k_{ppl} = a_{kppl} \cdot Q_{00} + b_{kppl} \quad (24)$$

przy czym:  $a_{kppl} = 40,3$ ;  $b_{kppl} = 3,9 \cdot 10^{-2}$

Po uwzględnieniu zależności (4), (5) ujmującej wpływ czasu trwania impulsu  $t_i$  na wartość przyrostów  $\Delta x_3$



otrzymano zależności opisujące zmiany położenia tłoczynek siłowników w postaci:

$$x_{3plt} = x_{pl} \cdot Q_{00} + b_{xpl} + a_{kppl} \cdot Q_{00} + b_{kppl} \cdot T_i - T_{i0}$$

dla  $U_z = U_A$

25

$$x_{3mit} = x_{mi} \cdot Q_{00} + b_{xmi} + k_{pmi} \cdot Q_{00} + b_{kpmi} \cdot T_i - T_{i0}$$

dla  $U_z = U_B$

26

Tablica 3

$x_{3pl}$					
$x_{pl}$	$b_{xpl}$	$C_{xpl}$	$b_{xpl}$	$b_{xpl}$	$C_{b_{xpl}}$
$\frac{s}{m^2 \cdot N^2}$	$\frac{s}{m^2 \cdot N}$	$\frac{s}{m^2}$	$\frac{m}{N^2}$	$\frac{m}{N}$	m
$-1,2 \cdot 10^{-11}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	3,1	$9,36 \cdot 10^{14}$	$-3,444 \cdot 10^8$	$-1,82 \cdot 10^4$
$x_{3mi}$					
$x_{mi}$	$b_{xmi}$	$C_{xmi}$	$b_{xmi}$	$b_{b_{xmi}}$	$C_{b_{xmi}}$
$m^2 \cdot N \frac{s}{2}$	$\frac{s}{m^2 \cdot N}$	$\frac{s}{m^2}$	$\frac{m}{N^2}$	$\frac{m}{N}$	m
$-2,056 \cdot 10^{10}$	$5,028 \cdot 10^5$	-3,42	$2,658 \cdot 10^{13}$	$-1,9487 \cdot 10^7$	$5,29 \cdot 10^4$
$k_{pmi}$					
$k_{pmi}$	$b_{kpmi}$	$C_{kpmi}$	$b_{kpmi}$	$b_{b_{kpmi}}$	$C_{b_{kpmi}}$
$\frac{1}{m^2 \cdot N^2}$	$\frac{1}{m^2 \cdot N}$	$\frac{1}{m^2}$	$\frac{m}{s \cdot N^2}$	$\frac{m}{s \cdot N}$	$\frac{m}{s}$
$2,6 \cdot 10^{-9}$	$3,82 \cdot 10^{-4}$	-50	$-1,136 \cdot 10^{11}$	$-1,856 \cdot 10^6$	$-2,48 \cdot 10^2$

otrzymano zależności opisujące zmiany położenia tłoczyk siłowników w postaci:

$$\Delta x_{3pl} = a_{xpl} \cdot Q_{00} + b_{xpl} + (a_{kpl} \cdot Q_{00} + b_{kpl}) \cdot (T_i - T_{i0})$$

dla  $U_z = UA$  (25)

$$\Delta x_{3mi} = a_{xmi} \cdot Q_{00} + b_{xmi} + (k_{pmi} \cdot Q_{00} + b_{kmi}) \cdot (T_i - T_{i0})$$

dla  $U_z = UB$  (26)

Tablica 3

$\Delta x_{3pl}$					
$a_{xpl}$	$b_{xpl}$	$c_{xpl}$	$a_{bxpl}$	$b_{bxpl}$	$c_{bxpl}$
$\frac{s}{m^2 \cdot N^2}$	$\frac{s}{m^2 \cdot N}$	$\frac{s}{m^2}$	$\frac{m}{N^2}$	$\frac{m}{N}$	m
$-1,2 \cdot 10^{-11}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	3,1	$9,36 \cdot 10^{-14}$	$-3,444 \cdot 10^{-8}$	$-1,82 \cdot 10^{-4}$
$\Delta x_{3mi}$					
$a_{xmi}$	$b_{xmi}$	$c_{xmi}$	$a_{bxmi}$	$b_{bxmi}$	$c_{bxmi}$
$\frac{s}{m^2 \cdot N^2}$	$\frac{s}{m^2 \cdot N}$	$\frac{s}{m^2}$	$\frac{m}{N^2}$	$\frac{m}{N}$	m
$-2,056 \cdot 10^{-10}$	$5,028 \cdot 10^{-5}$	-3,42	$2,658 \cdot 10^{-13}$	$-1,9487 \cdot 10^{-7}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$
$k_{pmi}$					
$a_{kpmi}$	$b_{kpmi}$	$c_{kpmi}$	$a_{bkpmi}$	$b_{bkpmi}$	$c_{bkpmi}$
$\frac{1}{m^2 \cdot N^2}$	$\frac{1}{m^2 \cdot N}$	$\frac{1}{m^2}$	$\frac{m}{s \cdot N^2}$	$\frac{m}{s \cdot N}$	$\frac{m}{s}$
$2,6 \cdot 10^{-9}$	$3,82 \cdot 10^{-4}$	-50	$-1,136 \cdot 10^{-11}$	$-1,856 \cdot 10^{-6}$	$-2,48 \cdot 10^{-2}$

Zależności (18), ..., (23) i (25) , (26) stanowią model zastępczy układu elektrohydraulicznego.

### 3.5. Wnioski.

Zbudowano model zastępczy układu elektrohydraulicznego w którym jedyną wielkością wyjściową jest położenie tłoczyska siłownika  $x_3$ . Wielkością wejściową jest napięcie  $U_z$ .

Położenie  $x_3$  zmienia się skokowo w momentach podania napięcia  $U_z = U_A$  lub  $U_z = U_B$ , zgodnie z zależnościami (25) i (26).

Przyrosty położenia  $\Delta x_3$  są funkcjami wydatku pompy  $Q_{00}$ , siły  $F_t$  przyłożonej do lemiesza oraz czasu trwania impulsów  $t_i$ .

Jak wynika z zasady działania LSSMR, w modelu układu regulacji ciągnika, przyrosty  $\Delta x_{3p1}$  lub  $\Delta x_{3mi}$  będą obliczane w chwilach odpowiadających oświetleniu detektora promieniowania laserowego przez nadajnik laserowy.

## 4. MODEL MATEMATYCZNY ZGARNIARKI W RUCHU

### 4.1. Wstęp.

Modele mechaniczne pojazdów gąsienicowych można podzielić na modele ciągłe o parametrach rozłożonych oraz modele dyskretne o parametrach skupionych. Modele ciągłe, opisywane są równaniami różniczkowymi cząstkowymi, a modelowane układy charakteryzują się nieskończoną liczbą stopni swobody.

Trudności związane z rozwiązaniem układu równań różniczkowych cząstkowych powodują, że modele te są rzadko stosowane.

W przypadku, gdy da się wyróżnić elementy o dużej, w stosunku do innych masie, korzystnym jest przyjęcie modelu dyskretnego, opisanego równaniami różniczkowymi zwyczajnymi i o takiej liczbie stopni swobody, która umożliwi pełne ujęcie badanych zjawisk. W modelu dyskretnym skupione elementy masowe połączone są ze sobą elementami sztywnymi, sprężystymi i dyssypacyjnymi /tłumiki/, a siły zewnętrzne są siłami skupionymi, przyłożonymi w punktach redukcji mas.

Wnikliwy przegląd modeli mechanicznych pojazdów gąsienicowych przeprowadzony został przez A.W. Chodkowskiego w pracy [1]. Z analizy tej wynika m.in., że modele dyskretne były rozpatrywane jako układy mechaniczne o od 1 do 10 stopni swobody, w zależności od rodzaju prowadzonych badań i analiz.

W niniejszej pracy postanowiono zbudować dyskretny model spycharki gąsienicowej o 4 stopniach swobody, który uwzględnia:

- ruch gąsienic wzdłuż osi poziomej  $x - x_c(t)$
- przemieszczenie gąsienic wzdłuż osi pionowej  $y - y_c(t)$
- obrót gąsienic w płaszczyźnie  $x, y - \varphi(t)$
- obrót nadwozia ciągnika w płaszczyźnie  $x, y - \beta_f(t)$

Z zależności kinematycznych lemiesza będą wyznaczone ponadto dwie wielkości:

- położenie krawędzi skrawającej lemiesza wzdłuż osi poziomej  $x_1(t)$
- położenie krawędzi skrawającej lemiesza wzdłuż osi pionowej  $y_1(t)$

Chwilowe położenie krawędzi skrawającej lemiesza  $x$ ,  $y$  wyznacza nierówności, na które najeżdżają gąsienice ciągnika.

Przy modelowaniu spychacza w ruchu zakłada się, że:

- i/ masa nadwozia  $m_{KA}$  jest masą skupioną, umieszczoną w punkcie środka ciężkości nadwozia /rys.10/
- ii/ nadwozie zastąpione jest dwiema sztywnymi, nieważkimi, wzajemnie prostopadłymi belkami uwzględniającymi punkt obrotu nadwozia, punkt mocowania do resoru oraz środek ciężkości nadwozia /rys.10/. Resor wsparty jest na ramie nośnej.
- iii/ masa ramy nośnej wraz z ramą trakcyjną, osprzętem i gąsienicami jest reprezentowana przez dwie masy zastępcze  $m_{zp}$  i  $m_{zk}$  umieszczone odpowiednio na początku i na końcu sztywnej, nieważkiej belki  $blg$  o długości  $lg$  równej długości części gąsienic współpracującej z podłożem /rys.10/.

#### 4.2. Zależności kinematyczne

Współrzędne położenia końca lemiesza  $x_1$ ,  $y_1$  są funkcjami następujących wielkości występujących w modelu:

$$x_1 = f(x_c, \psi, \beta_p, x_3) \quad (27)$$

$$y_1 = f(y_c, \psi, \beta_p, x_3) \quad (28)$$

W oparciu o rys. 11 zależności (27), (28) można przedstawić następująco:

$$x_1 = x_c + x_{1h} \cdot \cos \left( \arctg \frac{h_{1em}}{x_{1em}} + \psi \right) \quad (29)$$

$$y_1 = y_c + x_{1h} \cdot \sin \left( \arctg \frac{h_{1em}}{x_{1em}} + \psi \right) \quad (30)$$

oraz:

$$x_{1h} = \sqrt{h_{1em}^2 + x_{1em}^2} \quad (31)$$

$$h_{1em} = h_b - c \cdot \sin \mu - f \cdot \sin(\mu + \beta_1) \quad (32)$$

$$x_{1em} = c \cdot \cos \mu + f \cdot \cos(\mu + \beta_1) - x_w \quad (33)$$

$$\mu = \alpha_1 - \gamma^e + \gamma^t \quad (34)$$

$$\alpha_1 = \arccos \frac{t_e^2 + p^2 - (l_{s1} - x_3)^2}{2 \cdot d \cdot \sqrt{t_e^2 + p^2}} \quad (35)$$

$$\gamma^e = \arctg \frac{p}{t_e} \quad (36)$$

$$p = r_{sil} \cdot \sin(\xi - \beta_p) + h_n \quad (37)$$

$$\xi = \arcsin \frac{p_0 - h_n}{r_{sil}} \quad (38)$$

W zależnościach (27) , ..., (38) stałe:  $h_b$ ,  $c$ ,  $\beta_1$ ,  $x_w$ ,

$y_0$ ,  $f$ ,  $t_e$ ,  $d$ ,  $r_{sil}$ ,  $p_0$ ,  $h_n$  są określone przez konstrukcję ciągnika.

Wartość  $l_{s1}$  jest długością siłownika, przy której lemiesz znajduje się w przybliżeniu na poziomie gąsienic.

#### 4.2.1. Nierówności wytwarzane przez lemiesz ciągnika

Zależności (27) , ... , (38) przedstawiają chwilowe położenia krawędzi skrawającej lemiesza określone współrzędnymi  $x_1$ ,  $y_1$ .

Nierówności wytwarzane przez lemiesz są modelowane przy pomocy dwóch zbiorów współrzędnych punktów  $x_1$ ,  $y_1$ . W czasie symulacji zbiory te są umieszczane w tablicy 1 i tablicy 2, które są zadeklarowane w programie symulacyjnym.

Tablica 1 zawiera zbiór wartości współrzędnych  $n_i$  punktów określających nierówności pod gąsienicami:  $x_{1i}$ ,  $y_{1i}$ ,  $i=1, \dots, n_i$ .

Współrzędne te oznaczono:  $x_1(i)$ ,  $y_1(i)$ . Przyjęto  $n_i=21$ .

Tablica 2 zawiera zbiór wartości współrzędnych  $p_j$  punktów określających nierówności ziemi na odcinku drogi pomiędzy krawędzią skrawającą lemiesza, a początkiem gąsienic,

t.j. punktem, w którym w modelu dyskretnym ciągnika znajduje się masa  $m_{zk}$ :  $x_{1j}$ ,  $y_{1j}$ ,  $j=1, \dots, p_j$ .

Ilość punktów  $p_j$  wynika z chwilowego położenia krawędzi skrawającej lemiesz w stosunku do początku gąsienic.

Ilość ta jest określona zależnością:

$$p_j = E \left( \frac{x_1 - x_c - l_g/2}{x_c} \right) \quad (39)$$

przy czym:

$x_c$  - odległość w poziomie pomiędzy kolejnymi współrzędnymi

$$x_{1j}, x_{1j+1}.$$

Współrzędne tablicy 2 oznaczono  $x_2(j)$ ,  $y_2(j)$ .

Do tablicy 2 są wpisywane współrzędne punktów  $x_1$ ,  $y_1$  w momentach, w których jest spełniona zależność:

$$k \cdot \Delta x_c - x_{1dop} < x_1 < k \cdot \Delta x_c + x_{1dop}, \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (40)$$

Wpisywanym wartościom współrzędnych jest przyporządkowany numer kolejny tablicy 2 określony zależnością (39).

W przypadku zmiany położenia gąsienic takiej, że współrzędna  $x_c$  wzrasta o wartości  $\Delta x_c$  następuje:

- i/ usunięcie z tablicy 1 wartości współrzędnych  $x_1(1)$ ,  $y_1(1)$  oraz
- ii/ przesunięcie w tablicach 1 i 2 wartości współrzędnych punktów tak, że:  $x_1(i) = x_1(i+1)$ ;  $y_1(i) = y_1(i+1)$ ;  
 $x_1(n_1) = x_2(1)$ ;  $y_1(n_1) = y_2(1)$ ;  $x_2(j) = x_2(j+1)$ ;  
 $y_2(j) = y_2(j+1)$



Oznacza to, że w tablicy 1 znajdują się współrzędne tylko tych punktów, które aktualnie znajdują się pod gąsienicami.

Na podstawie wartości zawartych w tablicy 1 jest modelowany przejazd ciągnika przez nierówności.

#### 4.3. Przejazd ciągnika przez nierówności.

Z obserwacji ruchu ciągnika gąsienicowego wyposażonego w lemiesz wynika, że w większości wypadków gąsienice przylegają całą powierzchnią do ziemi. Powodowane to jest osuwaniem się ziemi na skutek poślizgu gąsienic, spychaniem ziemi przez gąsienice oraz ustępowaniem ziemi pod wpływem działania sił ciężkości.

Przy modelowaniu przejazdu przez nierówności przyjęto następujące założenia:

- i/ Ze względu na przejazd ciągnika przez nierówności wytworzone przez lemiesz przyjmuje się, że nie występują przechyły boczne ciągnika.
- ii/ Nierówności ziemi pod ciągnikiem są opisywane przez zbiór  $n_i$  punktów o współrzędnych  $x_{1i}, y_{1i}$  /rozd.4.2.1/
- iii/ Położenie ciągnika jest określane przez wyznaczenie współrzędnych  $x_c, y_c$  środka belki blg /rys.10/ oraz kąta pochylenia gąsienic  $\varphi$  /rys. 11/.
- iv/ Wartość  $x_c$  jest określona następująco:

$$x_c = x_{c0} + \int v_0 \cdot \cos \varphi \cdot dt \quad (41)$$

przy czym:

$x_{c0}$  - wartość początkowa współrzędnej  $x_c$

$v_0$  - prędkość jazdy ciągnika

v/ W celu wyznaczenia kąta pochylenia gąsienic  $\psi$ , nierówności ziemi pod gąsienicami są aproksymowane funkcją:

$$f(x) = a_f \cdot x + b_f \quad (42)$$

przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Wtedy:

$$\psi = \arctg(a_f) \quad (43)$$

vi/ Położenie środka gąsienic jest obliczane w oparciu o następujący lemat:

LEMAT

Jeżeli odległość pomiędzy wartościami  $x_{li}$  zbioru punktów o współrzędnych  $x_{li}$  jest stała, to przy aproksymacji tego zbioru funkcją liniową o postaci  $y = a_f \cdot x + b_f$ , w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów, wartość średnia rzędnych tych punktów jest równa wartości funkcji aproksymującej dokładnie w środku przedziału określonego przez zbiór wartości  $x_{li}$ .

Z powyższego lematu wynika, że:

$$y_c = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} y_{li} \quad (44)$$

vii/ Wprowadza się współczynnik  $q$  uwzględniający skrócenie rzutu gąsienic na płaszczyznę poziomą wskutek ich pochylenia o kąt  $\psi$ .

$$q = E \left( \frac{n-1}{2} : \sin \psi \right) \quad (45)$$

Współczynnik ten zapewnia obliczanie wielkości  $y_c$  i jedynie na podstawie punktów znajdujących się na rzucie pionowym belki blg.

Po uwzględnieniu zależności (45) otrzymamy:

$$y_c = \frac{1}{n_i - 2 \cdot q} \sum_{i=1+q}^{n_i - q} y_{li} \quad (46)$$

$$\psi = \arctg \frac{(n-2 \cdot q) \sum_{i=1+q}^{n_i - q} (x_{li} \cdot y_{li}) - \sum_{i=1+q}^{n_i - q} x_{li} \cdot \sum_{i=1+q}^{n_i - q} y_{li}}{(n-2 \cdot q) \sum_{i=1+q}^{n_i - q} x_{li}^2 - \left( \sum_{i=1+q}^{n_i - q} x_{li} \right)^2} \quad (47)$$

#### 4.3.1. Ustępowanie gruntu.

Zależności (46), (47) określają współrzędną środka belki blg -  $y_c$  oraz kąt pochylenia gąsienic -  $\psi$ , przy założeniu, że ciągnik jest nieważki. Ustępowanie gruntu na skutek działania sił masowych i sił ciężkości jest przyczyną zagłębienia się gąsienic.

Przyjmuje się, że:

- i/ Grunt po którym jedzie ciągnik jest niesprężysty.
- ii/ Siły powodujące zagłębienie gąsienic są skupione i przyłożone w dwóch punktach belki blg, w których są umieszczone masy zastępcze  $m_{zp}$  i  $m_{zk}$ .

iii/ Charakterystyka zagłębiania mas  $m_{zp}$  i  $m_{zk}$  w funkcji siły jest liniowa.

iv/ Charakterystyka dynamiczna procesu zagłębiania jest inercyjna.

Przyjmując, że zagłębienia mas  $m_{zp}$  i  $m_{zk}$  są równe odpowiednio:

$\Delta y_p$  oraz  $\Delta y_k$  otrzymamy zależności na skorygowane wartości tych wielkości  $/y_{cd}, \varphi_d/$ :

$$y_{cd} = y_c - \frac{\Delta y_p + \Delta y_k}{2} \quad (48)$$

$$\varphi_d = \varphi + \arctg \frac{y_p - y_k}{l_g \cdot \cos \varphi} \quad (49)$$

Wartości  $y_{cd}$  oraz  $\varphi_d$  są obliczane w procesie symulacji raz po każdej zmianie współrzędnej  $x_c$  o określoną wartość  $\Delta x_c$ .

Po uwzględnieniu założenia iv/ nn.rozdziału, otrzymamy ostatecznie następujące zależności na rzędną położenia środka gąsienic  $y_{cr}$  i kąt pochylenia gąsienic  $\varphi_r$ :

$$y_{cr} = y_{cro} + \frac{1}{T} \int (y_{cd} - y_{cr}) \cdot dt \quad (50)$$

$$\varphi_r = \varphi_{ro} + \frac{1}{T} \int (\varphi_d - \varphi_r) \cdot dt \quad (51)$$

Na podstawie rys.10 można napisać, że:

$$\Delta y_p = k_z \cdot \left( \frac{F_1 \cdot (l_g - c_1) + F_2 \cdot d_1}{l_g \cdot \cos \varphi} + m_{zp} \cdot g \right) \quad (52)$$

$$\Delta y_k = K_z \cdot \left( \frac{F_1 \cdot c_1 + F_2 \cdot (l_g - d_1)}{l_g \cdot \cos} + m_{zk} \cdot g \right) \quad (53)$$

przy czym:

$$F_1 = \frac{F_{mka} \cdot b}{a+b} \cdot \cos(\psi - \beta_p) \cdot \cos \beta_p \quad (54)$$

$$F_2 = K_r \cdot (\beta_p + \psi) \quad (55)$$

$g$  - przyspieszenie ziemskie

$F_{mka}$  - siła ciężkości pochodząca od masy zastępczej nadwozia  $m_{ka}$

Stałe  $c_1$ ,  $d_1$ ,  $a$ ,  $b$ , określone są przez konstrukcję ciągnika.

#### 4.4. Zależności dynamiczne

Przy modelowaniu zgarniarki w ruchu uwzględniono dynamikę ruchu obrotowego nadwozia ciągnika. Kąt pochylenia  $\beta_p$  wpływa zarówno na chwilowe wartości współrzędnych położenia krawędzi skrawającej lemiesza  $x_1$ ,  $y_1$  (29) , ... , (38) , jak i na wartość zagłębienia gąsienic  $y_{cd}$ ,  $\psi_d$  (46) , ... , (55) . Wpływ kąta  $\beta_p$  na nierówności wytwarzane przez lemiesz oraz na przejazd przez te nierówności uzasadnia celowość uwzględniania zależności  $\beta_p(t)$  w modelu zgarniarki w ruchu.

Obrót nadwozia, zachodzi na skutek działania sił: zewnętrznej - oddziałującej na lemiesz oraz ciężkości-pochodzącej od masy nadwozia i masy lemiesza.

Przy modelowaniu dynamiki uwzględniono również wpływ sił tarcia, sprężystości resoru oraz bezwładności.

Równanie opisujące stany dynamiczne przy obrotach nadwozia jest następujące:

$$J \cdot \frac{d^2 \beta_p}{dt^2} + M_h \cdot \frac{d \beta_p}{dt} + K_r \cdot (a+b) \cdot (\varphi_r - \beta_p) = F_{mka} \cdot r_{mka} \cdot \sin(\lambda - \varphi_r + \beta_p) + F_{rsil} \cdot r_{sil} \quad (56)$$

przy czym:

$$F_{rsil} = (F_t + M_t) \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2 - \gamma^e + \beta_p + \xi) \quad (57)$$

$$\alpha_2 = \arccos \frac{d^2 - t_e^e - p^2 + (l_{sl} - x_3)^2}{2 \cdot d \cdot (l_{sl} - x_3)} \quad (58)$$

$J$  - moment bezwładności nadwozia

$K_r$  - współczynnik sprężystości resoru

$M_h$  - współczynnik strat elementów dyssypacyjnych

Stałe  $r_{mka}$  oraz  $r_{sil}$  są określone przez konstrukcję ciągnika.

Przy budowie programu symulacyjnego równanie (56) przedstawiono w postaci trzech zależności:

$$\frac{d^2 \beta_p}{dt^2} = \frac{1}{J} \cdot F_{mka} \cdot r_{mka} \cdot \sin(\lambda - \varphi_r + \beta_p) + F_{rsil} \cdot r_{sil} - M_h \cdot \frac{d \beta_p}{dt} - K_r \cdot (a+b) \cdot (\varphi_r - \beta_p) \quad (57)$$

$$\frac{d \beta_p}{dt} = \beta_{ppro} + \int \frac{d^2 \beta_p}{dt^2} \cdot dt \quad (58)$$

$$\beta_p = \beta_{p0} + \int \frac{d \beta_p}{dt} \cdot dt \quad (59)$$

przy czym:

- $\dot{\beta}_{ppro}$  - wartość początkowa prędkości kątowej
- $\beta_{po}$  - wartość początkowa kąta obrotu nadwozia

Wartości momentu bezwładności  $J$  oraz współczynnika  $K_r$ ,  $M_h$  zostały oszacowane na podstawie przebiegów rzeczywistych  $\beta_p(t)$  [2]; a następnie zweryfikowane w oparciu o badania symulacyjne układu opisanego zależnością (56). Przy identyfikacji opisanego układu dynamicznego przyjęto wstępnie, że w stanie ustalonym kąt pochylenia nadwozia  $\beta_p$  przyjmuje wartość równą  $2^\circ$ .

W czasie symulacji komputerowej wartości  $J$ ,  $K_r$ ,  $M_h$  skorygowano tak, aby oscylacyjność i częstotliwość drgań własnych modelu były zgodne z wartościami rzeczywistymi tych parametrów.

#### 4.5. Układ regulacji automatycznej

Przedstawione w rozdz. 4 zależności (29), ..., (59) stanowią model zgarniarki w ruchu. Model ten umożliwia określenie położenia gąsienic, nadwozia i lemiesza zgarniarki w funkcji wysunięcia tłoczysk siłowników  $x_3$ .

W przypadku stosowania - przy sterowaniu zgarniarki - URA, w modelu zgarniarki w ruchu należy uwzględnić sprzężenie zwrotne od współrzędnej położenia krawędzi skrawającej lemiesza  $y_1$  oraz regulator i model zastępczy układu elektrohydraulicznego /rozdz.3/.

URA powinien zapewnić takie wystrojenie siłowników, aby wartość  $y_1$  była równa wartości zadanej głębokości prowadzenia lemiesza z określoną dokładnością.

Schemat blokowy układu sterowania zgarniarki z URA przedstawiono na rys.12.

W modelu tym przyjmuje się, że detektor promieniowania laserowego /rozd.1/ mierzący położenie lemiesza  $y_1$ , ma charakterystykę liniową, a regulatorem jest element trójpołożeniowy ze strefą nieczułości o wartości  $2 \cdot \Delta y_1$ . Zgodnie z istotą modelu zastępczego układu elektrohydraulicznego, korekta wysunięcia siłowników  $x_3$  zachodzi w momentach  $t=k \cdot T_{po}$  / $k=1,2,3,\dots$ / o ile  $|y_1| > \Delta y_1$ .  $T_{po}$  jest okresem powtarzania impulsów świetlnych wytwarzanych przez nadajnik laserowy.

W oparciu o schemat blokowy /rys. 12/ oraz analizę przeprowadzoną w rozdz.4, opracowano program symulacyjny zgarniarki w ruchu /załącznik 2/. Program ten jest podstawą przy symulacji zgarniarki w ruchu.

## 5. BADANIA SYMULACYJNE

Celem badań symulacyjnych jest wykazanie adekwatności modelu oraz wykazanie przydatności opracowanego modelu układu sterowania ciągnika przy analizie układu regulacji automatycznej zgarniarki w ruchu.

Podczas symulacji przeprowadzono sześć prób, mających na celu sprawdzenie zachowania się ciągnika w różnych



warunkach pracy.

Wartości parametrów modelu tj. wydatku pompy  $Q_{00}$ , czasu trwania impulsów sterujących  $t_i$ , prędkości roboczej ciągnika  $V_0$ , współczynnika ustępowania gruntu  $K_Z$  oraz siły  $F_t$  umieszczono w tabelicy 4.

Tablica 4

Lp	$Q_{00}$ $\frac{m^3}{s}$	$t_i$ s	$V_0$ $\frac{m}{s}$	$K_Z$ $\frac{m}{N}$	$F_t$ N	$\varphi_{r0}$ $1^\circ$
1	$2,67 \cdot 10^{-3}$	0,125	0,456	$6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4 \sin(x_c - x_{c0})$	0
2	$3,94 \cdot 10^{-3}$	0,125	0,278	$6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4 \sin[2(x_c - x_{c0})]$	0
3	$2,67 \cdot 10^{-3}$	0,125	1,390	$6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4 \sin[2(x_c - x_{c0})]$	0
4	$2,67 \cdot 10^{-3}$	0,125	0,278	$6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4 \sin[2(x_c - x_{c0})]$	0
5	$2,67 \cdot 10^{-3}$	0,125	0,278	$6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4 \sin[2(x_c - x_{c0})]$	2
6	$2,67 \cdot 10^{-3}$	0,125	0,278	$6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4 \sin[2(x_c - x_{c0})]$	5

W przypadkach 1, 2 i 3 /tablica 4/ zbadano zachowanie się ciągnika przy stałej wartości zadanej./płaszczyzny światła laserowego poziomu/.

W przypadkach 4, 5 i 6 /tablica 4/ zbadano zachowanie się ciągnika przy zasymulowaniu pochylenia płaszczyzny światła laserowego. Odpowiada to wprowadzeniu wartości zadanej w postaci funkcji liniowej:

$$y_i^* = y_{10} + K_n \cdot x_1 \quad (60)$$

Przypadek 5 i 6 /tablica 4/ ilustruje ruch ciągnika ze startem przy niezerowych warunkach początkowych kąta pochylenia gąsienic:  $\varphi_{r0} \neq 0$ .

5.1. Wyniki badań.

Badania symulacyjne zawierają zaledwie kilka kombinacji wartości parametrów wpływających na zachowanie się zgarniarki w ruchu. Podczas tych badań przyjęto, że częstotliwość impulsowania jest równa 3,3Hz, a czasy trwania impulsów podnoszenia i opuszczania lemiesz są jednakowe:  $t_i = 0,125s$ . Przyjęto również, że siła obciążająca lemiesz zmienia się sinusoidalnie w funkcji przebytej drogi /tablica 4/. Jednakże wyniki tych badań potwierdzają spostrzeżenia poczynione podczas badań poligonowych zgarniarki, a mianowicie: [3]

- i/ układ regulacji jest stabilny przy starcie z t.zw. "płaszczyzny startowej" przy wydatku pompy  $2,67 \cdot 10^{-3} m^3/s$  /160 l/min./ i prędkości jazdy 0,456 m/s /2 km/godz./ oraz przy wydatku pompy  $3,34 \cdot 10^{-3} m^3/s$  /200 l/min./ i prędkości jazdy 0,278 m/s /1 km/godz./. Uchyb regulacji w tych przypadkach nie przekracza  $\pm 3$  cm /przypadki 1,2 - tablica 4/.
- ii/ układ regulacji jest niestabilny przy prędkości jazdy ciągnika 1,39 m/s /5 km/godz./ i wydatku pompy  $2,67 \cdot 10^{-3} m^3/s$ , pomimo rozpoczęcia jazdy z t.zw. "płaszczyzny startowej" /przypadek 3 - tablica 4/.
- iii/ przy pochyleniu płaszczyzny światła laserowego do wartości 5%, układ regulacji zapewnia stabilną pracę zgarniarki przy uchybie regulacji nie przekraczającym  $\pm 3$  cm. /przypadek 4 - tablica 4/.
- iv/ przy starcie ciągnika z płaszczyzny pochylonej pod kątem  $\varphi_{ro} = 2^\circ$  do poziomu, układ regulacji jest w stanie wystabilizować zgarniarkę. Po wystabilizowaniu uchyb regulacji nie przekracza  $\pm 3$  cm. /przypadek 5 - tablica 4/
- v/ przy starcie ciągnika z płaszczyzny pochylonej pod kątem  $\varphi_{ro} = 5^\circ$ , układ regulacji jest zbyt wolny, by wystabilizować zgarniarkę. Zgarniarka zakopuje się w dole wykopanym przez lemiesz. /przypadek 6 - tablica 4/. [

## 5.2 Wnioski

Dotychczas przeprowadzone badania symulacyjne potwierdzają zgodność wyników otrzymanych w czasie symulacji komputerowej z wynikami otrzymanymi w czasie badań poligonowych.

Wyniki te pozwalają ocenić pozytywnie przydatność opracowanego modelu do badań układu regulacji automatycznej zgarniarki.

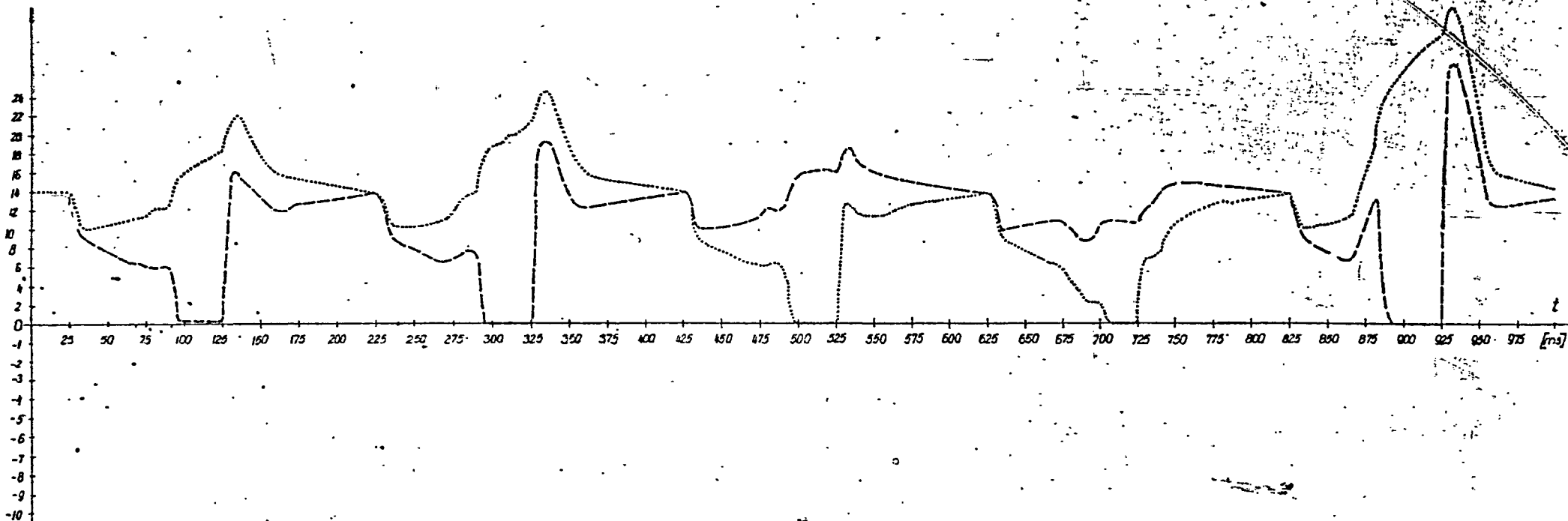
Uważa się za celowe prowadzenie dalszych badań symulacyjnych zmierzających do zoptymalizowania układu regulacji automatycznej zgarniarki, podczas których zbada się wpływ różnych wartości i ich kombinacji wielkości występujących w układzie rzeczywistym. Ponadto powinny zostać przebadane różne struktury URA, a m.in.: regulacja czasów trwania impulsów regulacji sterujących w funkcji wartości błędu regulacji, różne wartości strefy nieczułości regulatora, czy zmienna wartość wydatku pompy hydraulicznej w funkcji błędu regulacji.

Badania te powinny być prowadzone równoległe z badaniami poligonowymi i w ścisłej współpracy z KP HSW. Współpraca ta umożliwi ustalenie zakresu zmian parametrów badanego układu - określonego przez ograniczenia i możliwości systemu technicznego zgarniarki.

Uważa się za celowe zaproponowanie współpracy KP HSW.

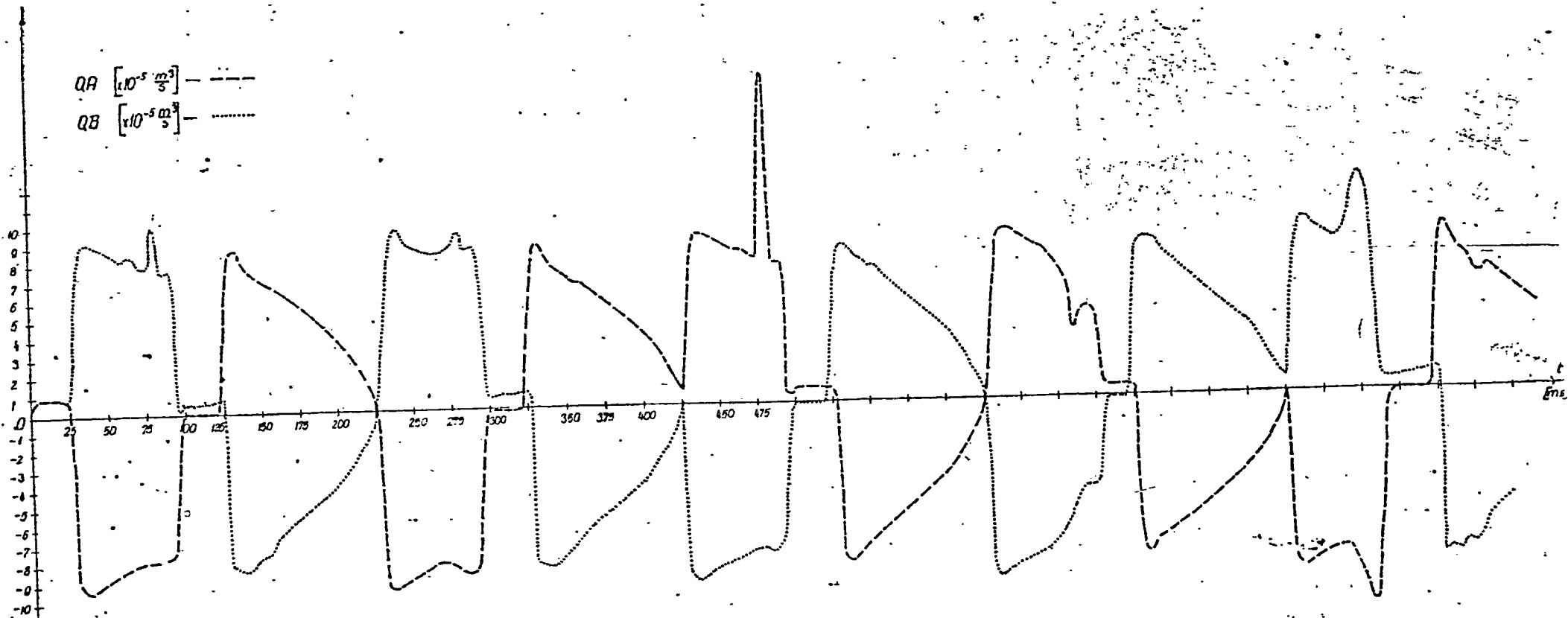
$p_A [ \times 2 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} ]$  ———

$p_B [ \times 2 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} ]$  - - - - -

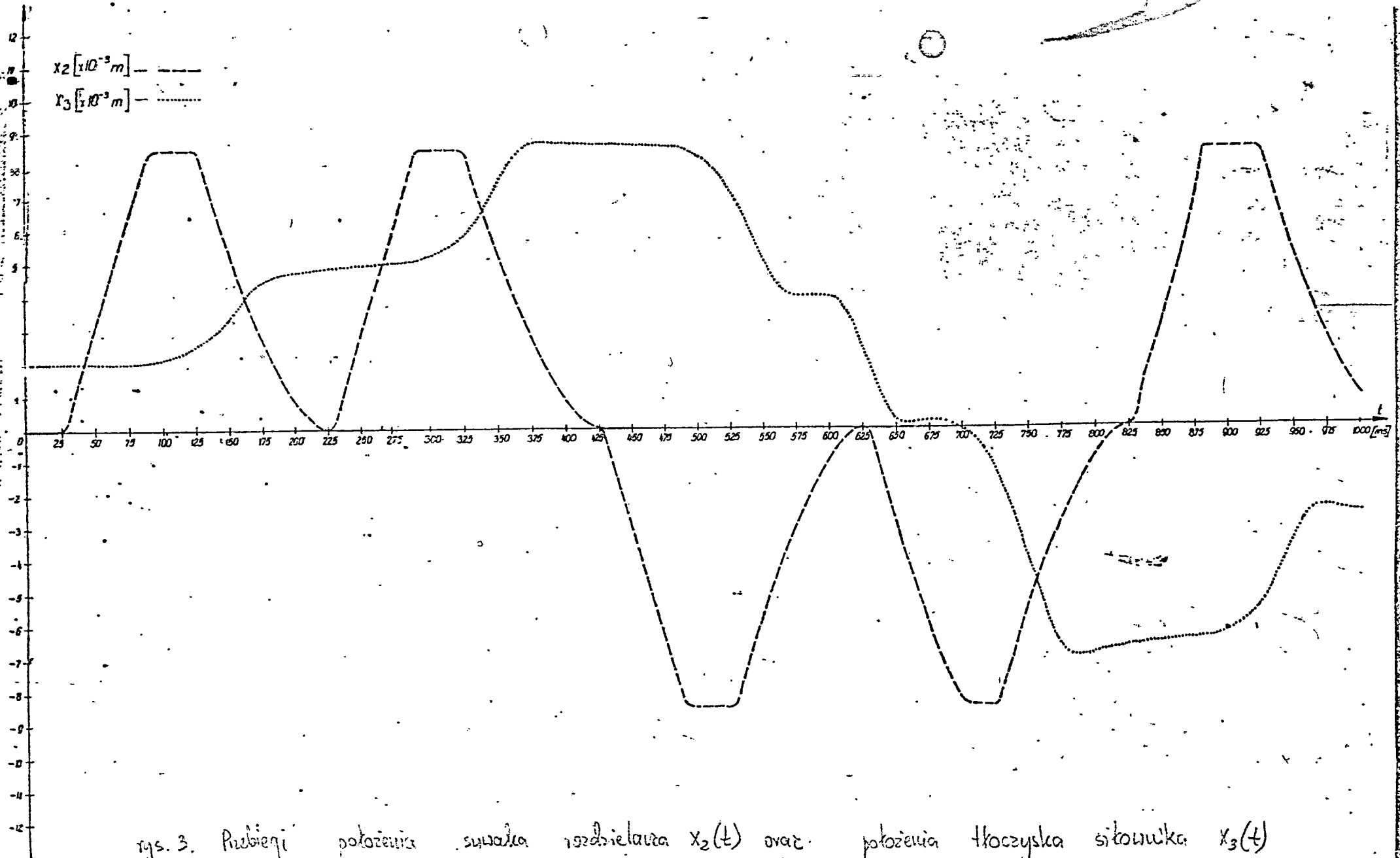


rys. 1 Przebiegi ciśnien  $p_a(t)$  i  $p_b(t)$

26

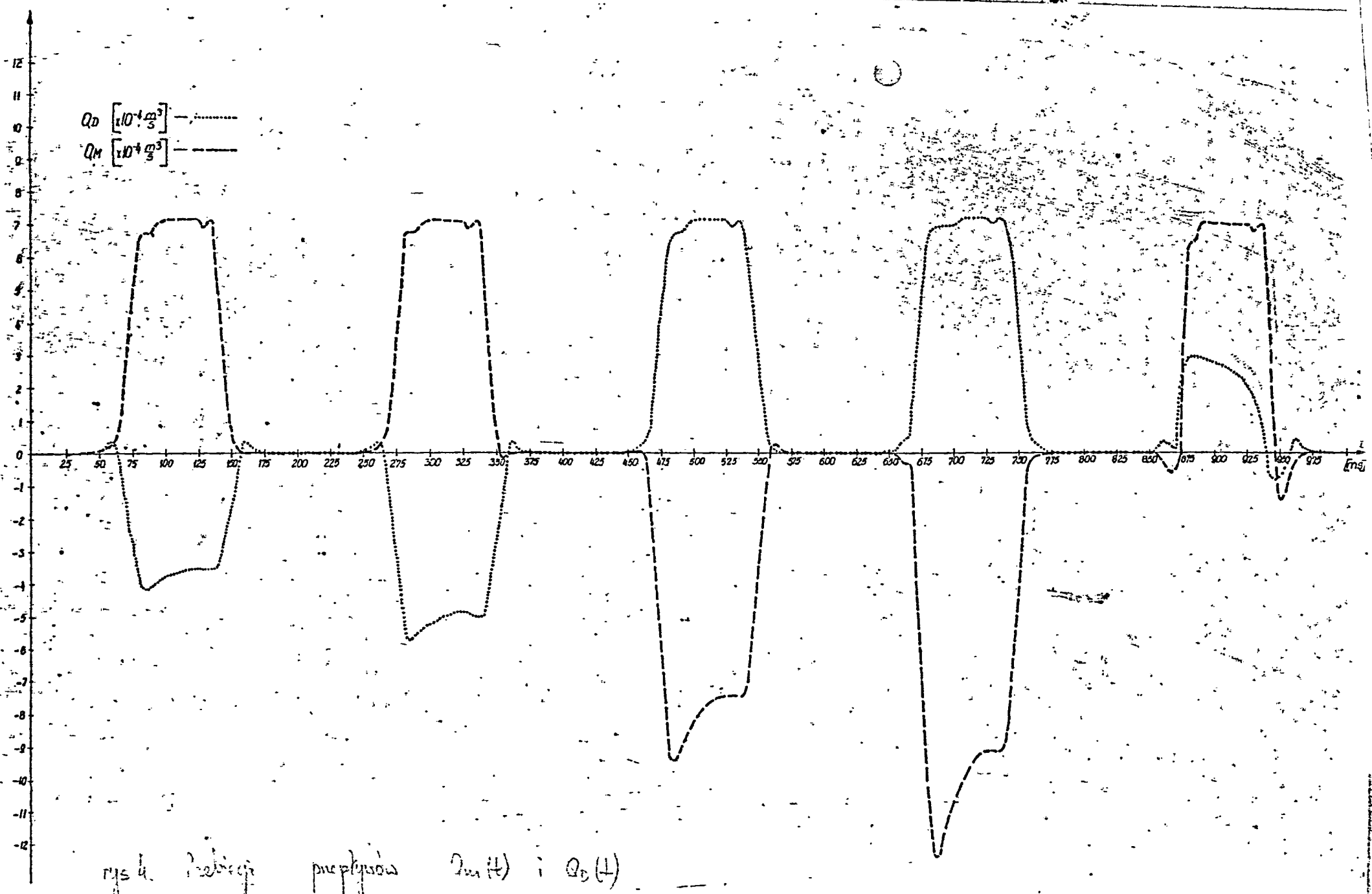


rys. 2 Przebiegi przepływów  $Q_a(t)$  i  $Q_b(t)$



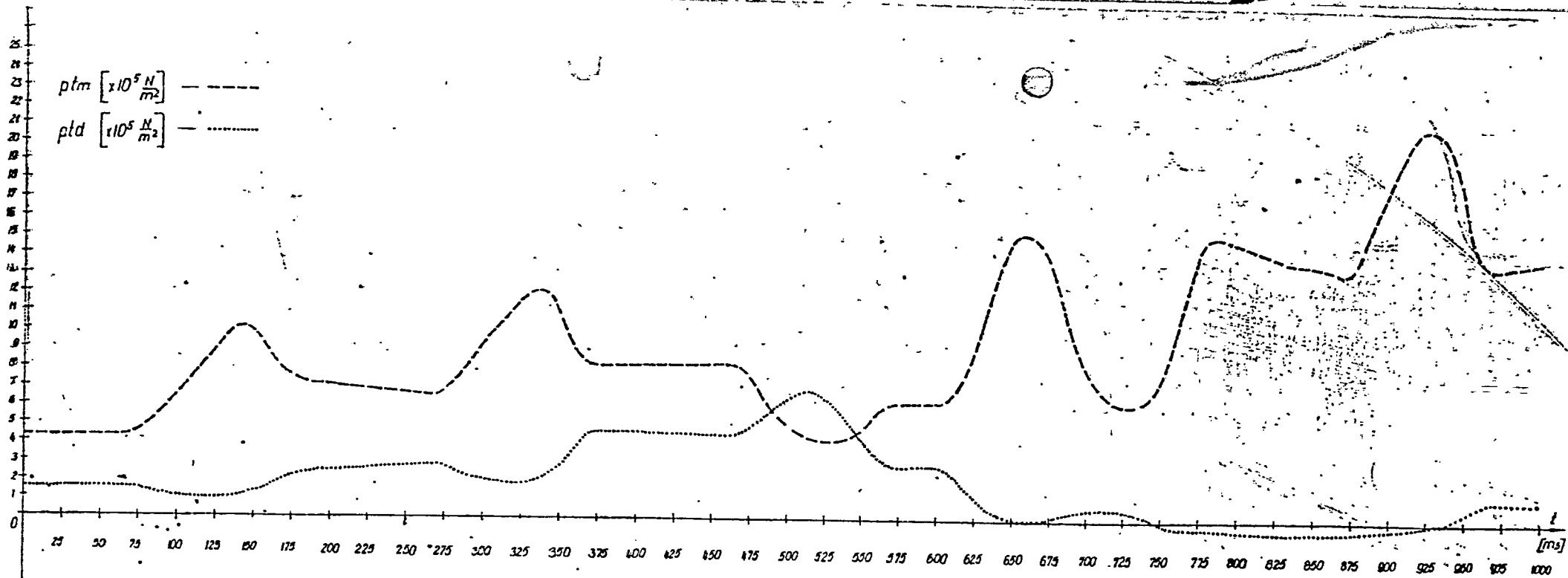
rys. 3. Przebiegi położenia suwaka rozdzielacza  $X_2(t)$  oraz położenia tłoczyska siłownika  $X_3(t)$

88



rys 4. przebiegi przepływu  $Q_M(t)$  i  $Q_D(t)$

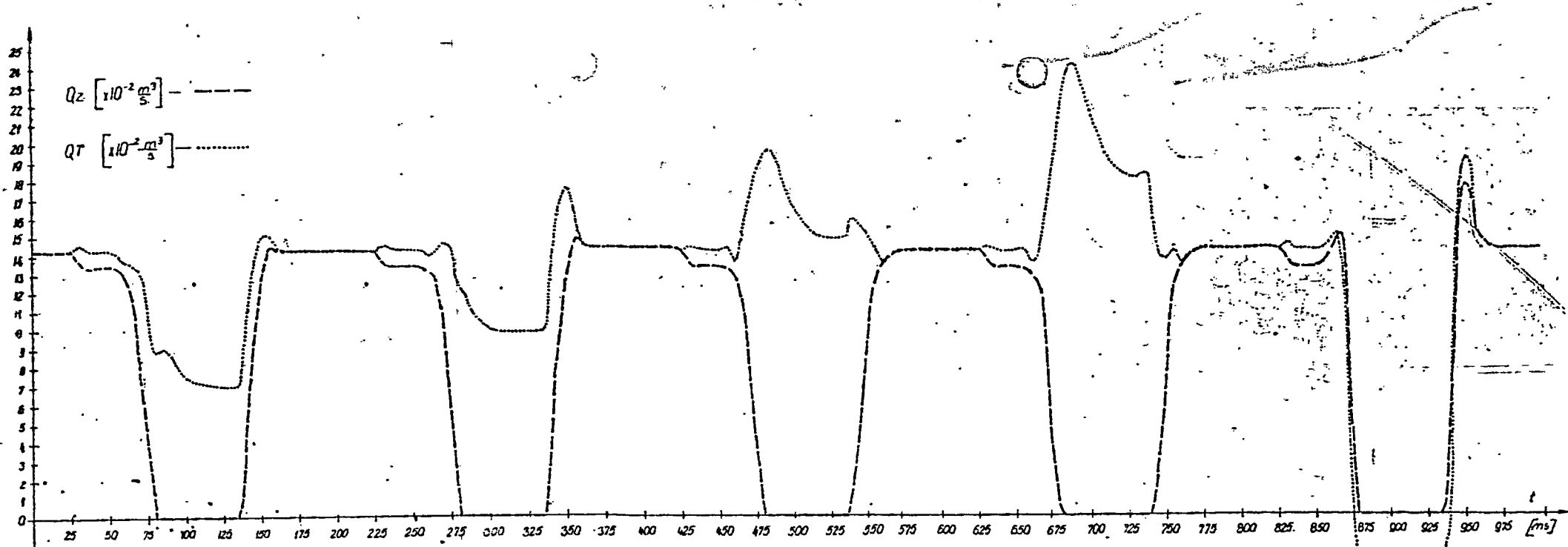
30



rys. 5. Przebiegi ciśnienia  $ptm(t)$  i  $ptd(t)$

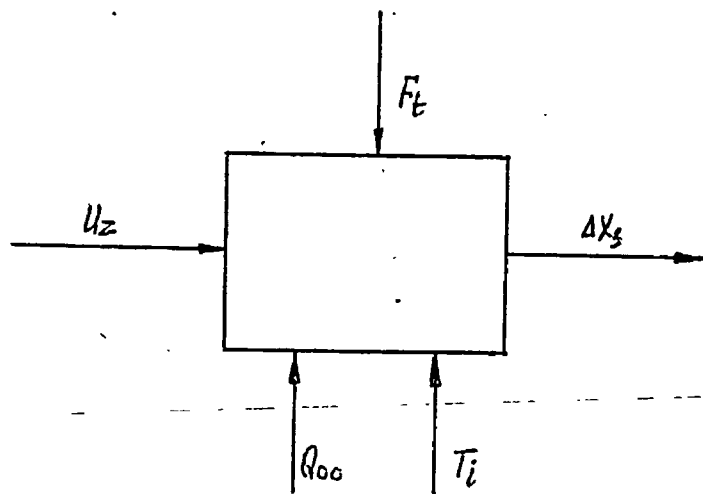
OH



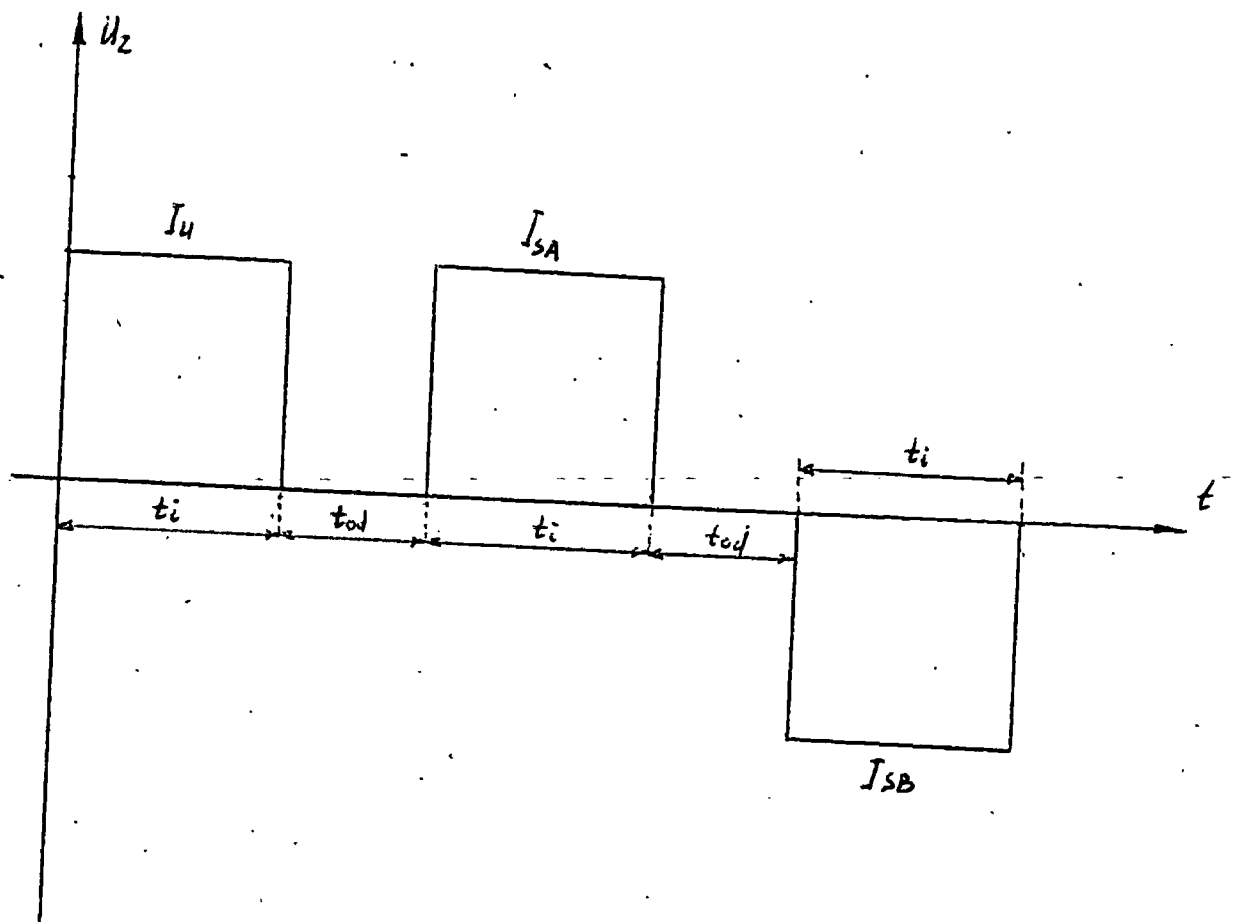


rys. 6. Przebiegi przepływów zlewnego  $Q_z(t)$  i zrotowego  $Q_T(t)$

PH



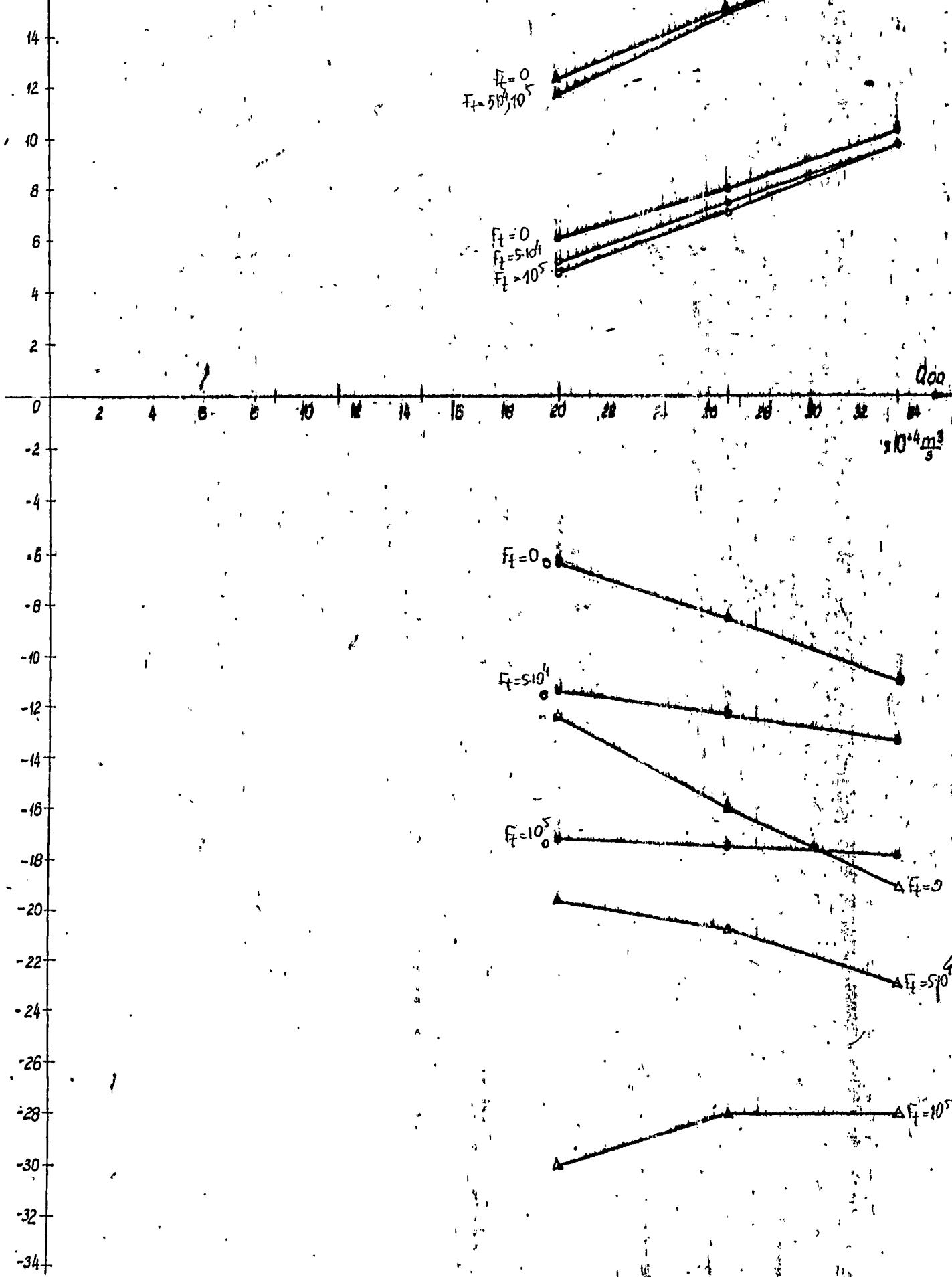
rys. 7. Model zastępczy układu elektrohydraulicznego



rys. 8. Impulsy sterujące podczas symulacji układu elektrohydraulicznego

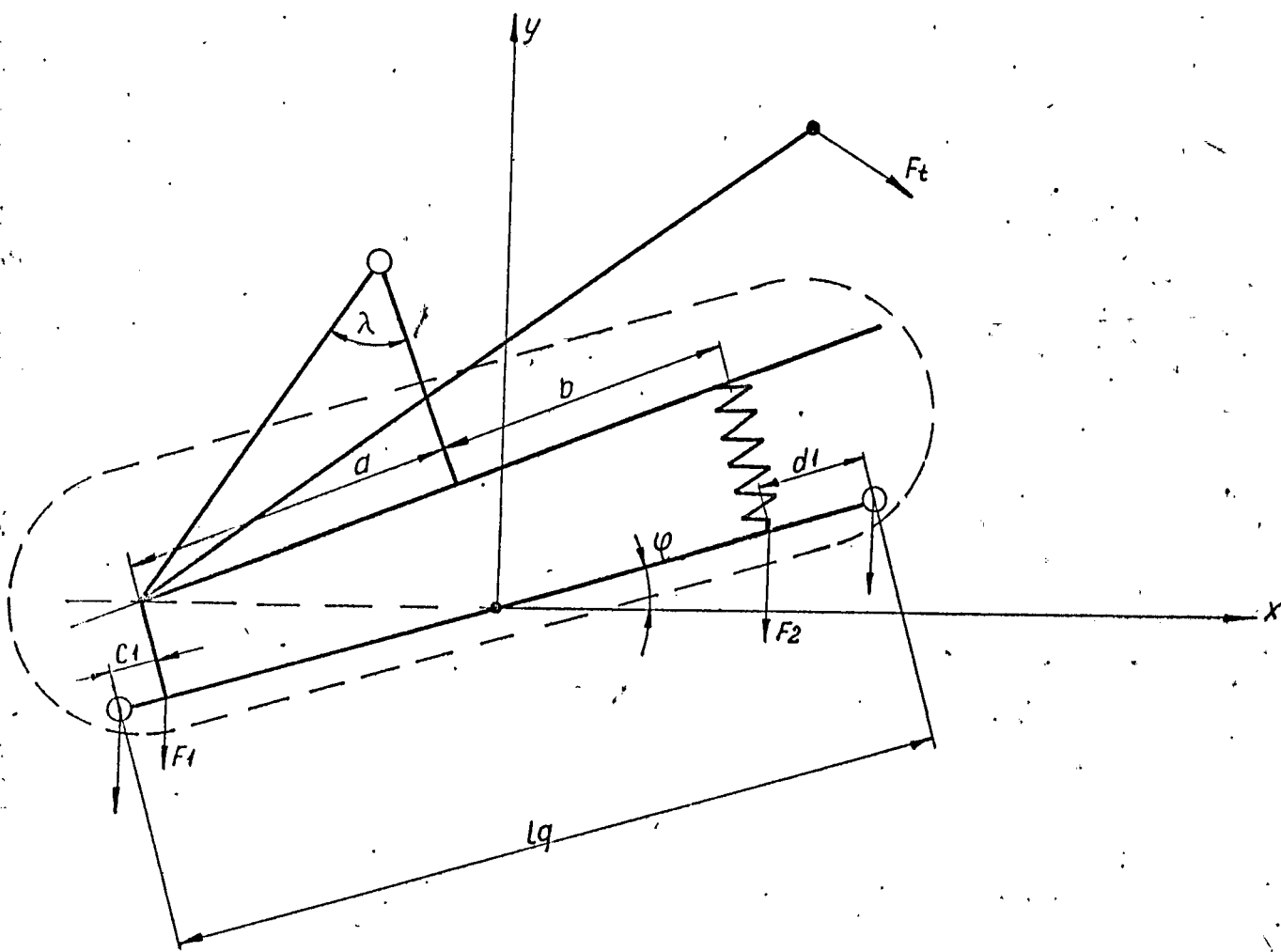
$[x \cdot 10^{-3} \text{ m}]$

$\Delta x_{3pl}, \Delta x_{3wi}$

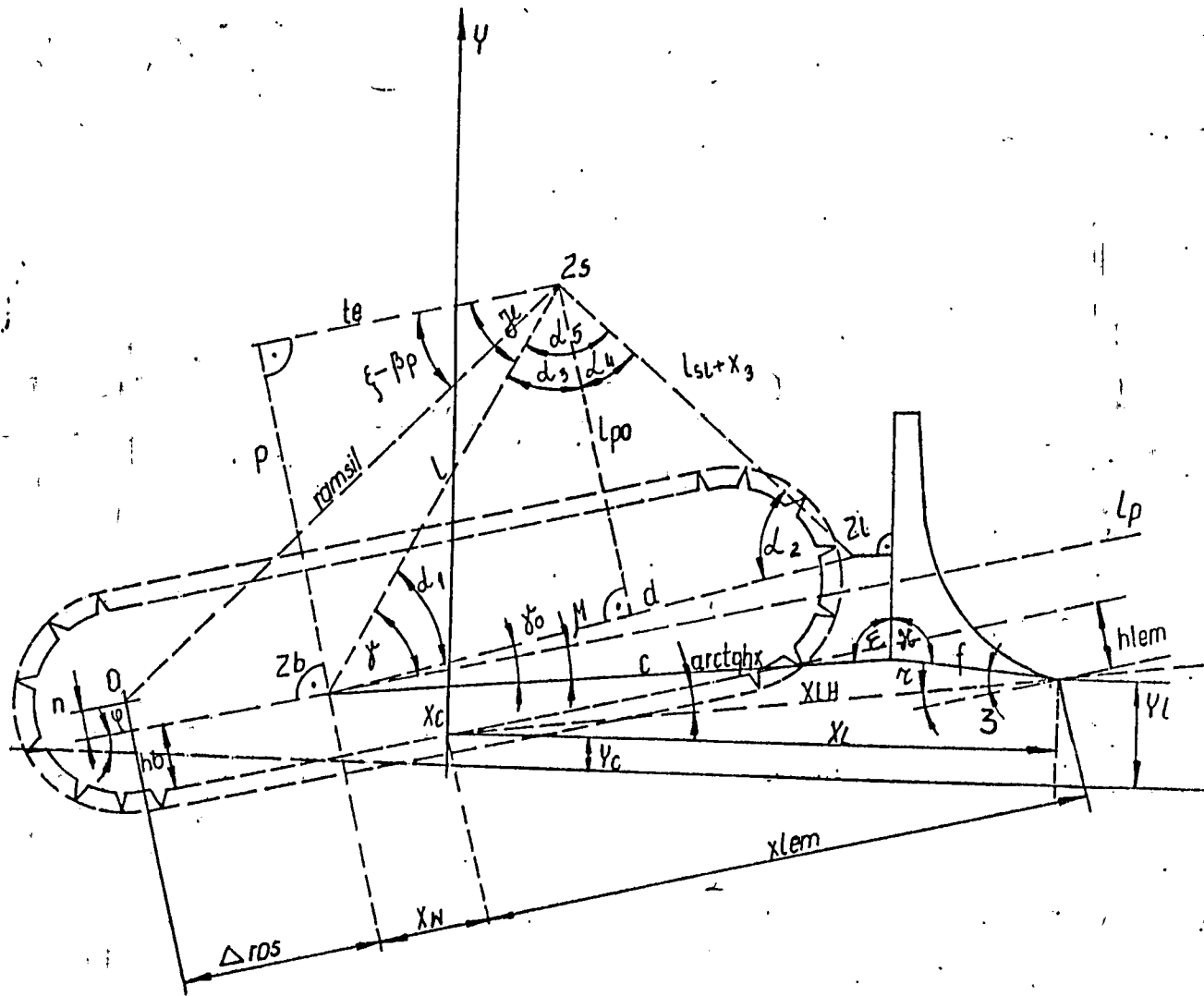


rys. 9 Zależności  $\Delta x_{3pl} = f(Q_{00}, F_t)$  ,  $\Delta x_{3wi} = f(Q_{00}, F_t)$

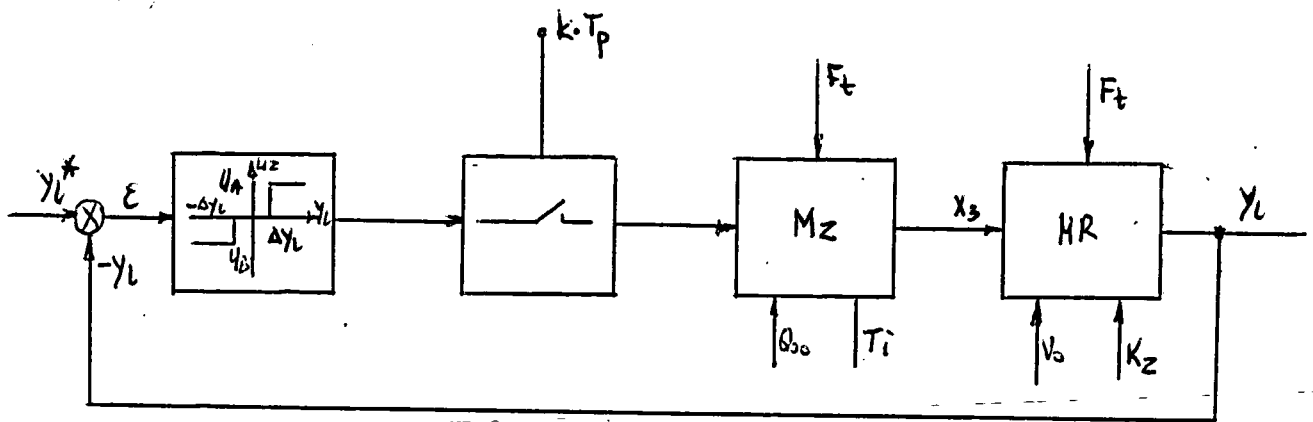
HH



rys. 10. Model dyskretny zgrzewarki



rys. 11. Układ kinematyczny zgarniarki



rys. 12. Układ regulacji automatycznej zgarwiarki

L I T E R A T U R A

- [1] Chodkowski A.W. "Budowa modelu szybkobieżnego pojazdu gasienicowego na tle ogólnego systemu: pojazd otoczenie operator. Praca habilitacyjna. Warszawa 1976
- [2] Sprawozdanie z badań funkcjonalnych modelu użytkowego układu sterowania lemieszem ciągnika TD-25c z wykorzystaniem techniki laserowej. OBRMZiT KP HSW.Sprawozdanie nr.596.Stalowa Wola 1978.
- [3] Sprawozdanie z badań ciągnika TD-25c ze sterowaniem laserowym. OBRMZiT KP HSW.Sprawozdanie nr.1075/83.Stalowa Wola 1983.



\*\*\*SYSTEM MODELWANIA PROCESOW CIAGLYCH\*\*\*

\*\*\* WERSJA 1.0 \*\*\*

\* MODEL ELEKTROHYDRAULICZNEGO UKLADU STEROWANIA LEMIESZEN CIAGNIKA  
MEMORY PQW,WP2,WP3,WP4

INITIAL

PARAMETER UA=24.,UB=24.

PARAMETER T0=.0375,TAU1=.021,TPI=.09,TP0=.15, ...  
C1=.72,D1=.01,E1=.005,A1=225897,B1=-3.1011E-3

PARAMETER B1H=.294,B2H=.94,M1=.01,MK=.05,K1=5886.,D11=5.E-3,DEL1=8.8E-3

PARAMETER X1N=3.3E-3,X110=3.9E-3,X120=4.28E-3,X11=4.9E-3,X12=6.E-3, ...  
X1P=4.1E-3,X1LIM=6.6E-3

PARAMETER C21=8266.,C22=9.244E6,C23=1.193E5,C24=1.064

PARAMETER CQZ=3.1E-6,CZAB=1.E-7,C0AB=1.55E-7

PARAMETER PPOCZ=1.17E6,PPOCZ1=5.13E5

PARAMETER CBP1=1.E-4,CBP2=.94,CBP3=1.4E9,CBP4=13.5,CQR=2.14E-6

PARAMETER B3H=9.37,M2=.93,K2=44127.,A2=6.15E-4,V0=1.73E-5,D22=28.E-3, ...  
DEL2=-3.E-3

PARAMETER X20=.8E-3,X21=4.8E-3,X22=7.1E-3,X2MAX=8.5E-3,X211=3.3E-3, ...  
X212=4.926E-3

PARAMETER CQJ=1.03E-3

PARAMETER C26=3325.,C27=1.585,C28=20.894,C29=19.646,C30=2.5644, ...  
C31=7.113,C32=7.484,C33=26.,C34=15.67,C35=18.8,C36=9.62, ...  
C37=11.86,C38=110.,C39=21813.,BETA=.5768

PARAMETER V0M=4.629E-3,V0D=9.047E-3,ATM=107.6E-4,ATD=153.3E-4

PARAMETER AP=1.E-6,TH=1.E-3,APP=.055

PARAMETER X3MAX=.7,X3MIN=-.4

PARAMETER RO=850.,PAT=1.02E5

PARAMETER Q00=1.13E-3,FT=1.E5

PARAMETER KQ0=.18E-11

PARAMETER MR1=2391.,MR2=240.,MT1=4295.,MT2=16000.

PARAMETER X41=7.E-3,X42=.0146,X43=.012,X4MAX=.0176,X04=12.7E-3, ...  
A4=1.35E-3,DEAX4=1.E-5,K4=5950.,C4=2.07E-4,M4=.45

PARAMETER X6MAX=9.E-3,X06=14.7E-3,A6=4.498E-4,C6=1.035E-5, ...  
DEAX6=1.E-10,K6=2200.

PARAMETER ABH=1.0844E6,BBH=.2.6026E4,CBH=164.42,CPDLA=3.3E10

PARAMETER ILS=2.

INCON CX20=0.,WP20=0.,X2PP0=0.,QD0=0.,QM0=0.

INCON CX30=0.,WP30=0.

INCON PTM0=0.,PTD0=0.,QJ0=0.,QR0=0.

INCON CX40=0.,X4PP0=0.,WP40=0.

INCON X3PP0=(-2.E-12,1.E-11,0.,1.E-12,1.E-11)

CONSTANT GZ=9.806

CONSTANT TA=5.E5,FTID=1.1E4,FTIM=1.1E4

ODILS=1./ILS

PZ1=C21+C22\*Q00+C23\*Q00\*\*C24

PO=PZ1+(Q00/CQZ)\*\*2+PPOCZ

SFCH=COS(2\*3.14159\*69./360.)\*RO/3.14159

CHAB=SFCH\*CZAB\*\*2/(D11\*(X12-X11))

CHU=CHAB\*(X12-X11)/(X120-X110)

CHS=SFCH/(D22\*(X22-X21))

POD1=PO\*DEL1

```

PAU=PO
PBU=PO
PZK0=PZ1
POK0=PO
TAX4=(1.-DEAX4)/(X42-X41)
TAX6=(1.-DEAX6)/X6MAX
PO6=K6*X06/A6
BE=1.-S*EXP((T0-TPI)/TAU1)+72.*TPI
TM=(D1*BE+E1)/C1
TN=-B1/A1

```

DYNAMIC

```

UA1=UA*(STEP(0.)-STEP(TPI)+STEP(TP0)-STEP(TP0+TPI))
UB1=UB*(STEP(2.*TP0)-STEP(2.*TP0+TPI))

```

```

Q0=Q00-KR0*POK
XP1=(A1*TIME+B1)*NOT(STEP(TPI))*STEP(TN)+(C1*TIME+D1*BE+E1)*STEP
(STEP(TPI)-STEP(TM))
XP2=DELAY(100,2*TP0,XP1,1)
XP3=DELAY(200,2*TP0,XP1+XP2,2)
XPP=XP1+XP2+XP3+DELAY(400,4*TP0,XP1+XP2+XP3,3)

```

```

X1A=XPP*PULSE(TM,UA1)
X1B=XPP*PULSE(TM,UB1)

```

```

QA=QAZ+Q0A
QAZ=CZAB*AZX1A*SQRT(ABS(PA-PZK))*SIGN(1.,PA-PZK)
Q0A=COAB*A0X1A*SQRT(ABS(PA-POK))*SIGN(1.,PA-POK)
AZX1A=FCNSW(DEADSP(X11,X12,X1A),0.,(X1A-X11)/(X12-X11),1.)
A0X1A=FCNSW(DEADSP(X110,X120,X1A),1.,1.-X1A-X110)/(X120-X110),0.

```

```

QB=QBZ+Q0B
QBZ=CZAB*AZX1B*SQRT(ABS(PB-PZK))*SIGN(1.,PB-PZK)
Q0B=COAB*A0X1B*SQRT(ABS(PB-POK))*SIGN(1.,PB-POK)
AZX1B=FCNSW(DEADSP(X11,X12,X1B),0.,(X1B-X11)/(X12-X11),1.)
A0X1B=FCNSW(DEADSP(X110,X120,X1B),1.,1.-X1B-X110)/(X120-X110),0.

```

```

PA=INTGRL(PA0,BVA*(QQA+A2*X2PRIM))
PB=INTGRL(PB0,BVB*(QQB+A2*X2PRIM))
BVA=CBP2*PAA*(CBP3+CBP4*PAA)/((V0+A2*X2)*(PAA+CBP1*
(CBP3+CBP4*PAA)))
BVB=CBP2*PBA*(CBP3+CBP4*PBA)/((V0+A2*X2)*(PBA+CBP1*
(CBP3+CBP4*PBA)))
PAA=PA+PAT
PBA=PB+PAT

```

\* KIERUNEK DODATNI PRZY RUCHU OD B DO A

```

X2WTOR=(A2*(PB-PA)-F2H+B3H*X2PRIM-FSP2)/M2

```

```

CX2=INTGRL(CX20,X2WTOR)

```

```

PROCEDURE X2PRIM,WP2=WP2(WP20,FSP2,PB,PA,X2MAX,X2WTOR,CX2,X2)
IF(TIME.EQ.0.)WP2=WP20
IF(ABS(X2).GE.X2MAX.AND*(F2H+FSP2).LE.A2*ABS(PB-PA))GO TO 101
GO TO 102
101 WP2=-CX2
102 X2PRIM=WP2+CX2
ENDPRO

```

```

X2PP=INTGRL(X2PP0,X2PRIM)
X2=LIMIT(-X2MAX,X2MAX,X2PP)
FSP2=FCNSW(DEADSP(X20,X20,X2),K2*(X2-X20),2.*K2*X2,K2*(X2+X20))

F2HP=CHS*QR+ABS(QR)/AQR+ROD2*QRPRIM
F2H=FCNSW(DEADSP(X21,X21,X2),F2HP,0.,F2HP)
QRPRIM=FCNSW(X2,ATD*X3WTOR,ATD*X3WTOR,ATM*X3WTOR)

```

```

QJF=ODILS*COJ*AQJ*SQRT(ABS(PCJ))*SIGN(1.,PCJ)
QJ=INTGRL(QJ0,(QJF-QJ)/TH)
QT=-ILS*QJ+QZ+QAZ+QBZ
PZK1=LIMIT(-PAT,1,1E10/(C21+C22*QT+C23*(ABS(QT))*C24*SIGN(1.,QT)))
PZK=INTGRL(PZK0,(PZK1-PZK)/(10.*DELT))
AQJ=FCNSW(DEADSP(X21,X22,ABS(X2)),AP,ABS(X2)-X21,X22-X21)

```

```

QZ=(Q0-ILS*QR+Q0A+Q0B)*KLX22N+LIMIT(0.,10.,
CQZ*AQZ*SQRT(ABS(P0K-PZK-PPOCZ))*SIGN(1.,P0K-PZK-PPOCZ))*KLX22
P0K2=(PZK+(QZ/(CQZ*AQZ))*2+PPOCZ)*KLX22N+
((ILS*QR/(CQR*AQR))*2+PTMD+PPOCZ1)*KLX22
P0K1=LIMIT(-PAT,1,1.46E7,P0K2)
P0K=INTGRL(P0K0,(P0K1-P0K)/(10.*DELT))
PTMD=INSW(X2,PTD,PTM)
PQR=P0K-PTMD-PPOCZ1
QRPOM=LIMIT(-10.,(Q0+Q0A+Q0B)/ILS,ODILS*CQR*AQR*SQRT(ABS(PQR))*
SIGN(1.,PQR))*KLX22N+ODILS*(Q0+Q0A+Q0B-QZ)*KLX22
QR=INTGRL(QR0,(QRPOM-QR)/TH)

```

```

KLX22,KLX22N=OUTSW(X22-ABS(X2),1)
AQZ=FCNSW(DEADSP(X21,X22,ABS(X2)),1,1-(1.-AP)*(ABS(X2)-X21)/
(X22-X21)+AP,AP)
AQR1=FCNSW(DEADSP(X211,X212,ABS(X2)),AP,(APP-AP)*(ABS(X2)-X211)/
(X212-X211)+AP,APP)
AQR=FCNSW(DEADSP(X212,X22,ABS(X2)),AQR1,(1.-APP)*(ABS(X2)-X212)/
(X22-X212)+APP,1)

```

```

QJD=ODILS*COJ*AQJ*SQRT(ABS(PZK-PTD))*SIGN(1.,PZK-PTD)
QJM=ODILS*COJ*AQJ*SQRT(ABS(PZK-PTM))*SIGN(1.,PZK-PTM)
QRD=ODILS*CQR*AQR*SQRT(ABS(PQRD))*SIGN(1.,PQRD)
PQRD=PQR+PTMD-PTD
QRM=ODILS*CQR*AQR*SQRT(ABS(PQRM))*SIGN(1.,PQRM)
PQRM=PQR+PTMD-PTM
QDP=FCNSW(DEADSP(-X21,X21,X2),QJ,QJ+QD,QJ)
QMP=FCNSW(DEADSP(-X21,X21,X2),QJ,QJ+QM,QJ)
QD=INTGRL(QD0,(QDP-QD)/TH)
QM=INTGRL(QM0,(QMP-QM)/TH)
PTM=INTGRL(PTM0,BVM*(QME-QZZ-ATM*X3PRIM))
PTD=INTGRL(PTD0,BVD*(QD+QZZ+ATM*X3PRIM))
BVM=CBP2*PTMA*(CBP3+CBP4*PTMA)/((VOM+ATM*X3)*(PTMA+CBP1*
(CBP3+CBP4*PTMA)))
BVD=CBP2*PTDA*(CBP3+CBP4*PTDA)/((VOM+ATD*X3)*(PTDA+CBP1*
(CBP3+CBP4*PTDA)))
PTMA=PTM+PAT
PTDA=PTD+PAT

```

```

PROCEDURE FTI=FTI(TA,FTID,FTIM,X3PRIM)
FTIP=TA*X3PRIM
FTI=FTIP
IF(FTIP.GT.FTID)FTI=FTID
IF(FTIP.LT.FTIM)FTI=FTIM
ENDPRO

```

\* KIERUNEK DODATNI PRZY RUCHU OD N DO D

```

X3WTP=2.*(ATM*PTM-ATD*PTD)-FTENT
X3WTOR=(X3WTP-FTI)/MR
CX3=INTGRL(CX30,X3WTOR)

```

```

PROCEDURE X3PRIM,WP3=WP30(X3WTP,CX3,X3)
IF(TIME.EQ.0)WP3=Wp30
IF(X3.LE.X3MIN.AND.X3WTP.LE.0)GO TO 301
GO TO 302
301 WP3=-CX3
302 X3PRIM=WP3+CX3
ENDPRO

```

```

X3PP=INTGRL(X3PP0,X3PRIM)
X3=LIMIT(X3MIN,X3MAX,X3PP)

```

```

MT=MT1+MT2*X3*CONPAR(X3,0)
MR=MR1+MR2*X3

```

PDLA = -CPLLA + QH \* ALS(QH)  
 FDP = (PTM - PTD - P06) \* (C6 \* C4 \* AX6 \* AX4) \*\* 2 / ((C6 \* AX6) \*\* 2 + (C4 \* AX4) \*\* 2)  
 QZZ = SQRT(INSW(C6, FDP, FDP))

AX4 = FCNSW(DEADSP(X41, X42, X4), DEAX4, TAX4 \* (X4 = X41) + DEAX4, 1.)  
 AX6 = FCNSW(DEADSP(0, X6MAX, X6), DEAX6, TAX6 \* X6 + DEAX6, 1.)  
 X6POM = (PTM - PTD) \* A6 / K6 \* X06  
 X6 = LIMIT(0, X6MAX, X6POM)

X4WTOR = (A4 \* PDLA - BH4 \* X4PRIM - K4 \* (X4 + X04)) / M4  
 CX4 = INTGRL(CX40, X4WTOR)

PROCEDURE X4PRIM, WP4 = WP4(WP40, X4MAX, X04, PTM, A4, K4, CX4, X4)  
 IF ((X4.GE.X4MAX.AND.A4.PDLA.GE.K4\*(X4-X04)).OR.  
 (X4.LE.0.AND.A4.PDLA.LE.K4\*(X4-X04))) GO TO 51  
 GO TO 52  
 51 WP4 = CX4  
 52 X4PRIM = WP4 + CX4  
 ENDPRO

X4PP = INTGRL(X4PPO, X4PRIM)  
 X4 = LIMIT(0, X4MAX, X4PP)

X4POM = INSW(X4, X43, X4, X43)  
 BH4 = ABH \* X4POM \*\* 2 + BBH \* X4POM + CBH

X1 = X1A + X1B

TERMINAL  
 TIMER FINTIM = .45, DELT = 1, DE = 4, PRDEL = 5, DEB = 3  
 METHOD SIMP  
 PRINT X1, X2, X3, X3PRIM  
 TITLE ELEKTROHYDRAULICZNY UKLAD STEROWANIA LEMIESZEM CIAGNIKA  
 END  
 STOP

SEKWENCJA ZMIENNYCH WYJSCIOWYCH

ODILS	SFCH	CHAB	CH0	CHS	ROD1	ROD2	PZ1	P0	PA0
PBO	PZK0	POK0	TAX4	TAX6	P06	BE	TM	TN	X2
FSP2	X3	MR	MT	X3WTP	WP3	X3PRIM	FTI	X3WTOR	QRPRIM
ACR1	AQR	F2HP	F2H	X2WTOR	WP2	X2PRIM	UA1	XP1	XPP
X1A	A0X1A	Q0A	XP2	XP3	AZX1A	QAZ	QA	PAA	BVA
ZZ0002	PA	UB1	X1B	A0X1B	Q0B	AZX1B	QBZ	QB	PBA
BVB	ZZ0004	PB	CX2	X2PP	PQJ	AQJ	QJP	ZZ0003	QJ
KLX22	KLX22	AGZ	Q0	QZ	OT	PZK1	ZZ0010	PZK	PTMD
P0K2	P0K1	ZZ0012	P0K	P0R	QRPOM	ZZ0014	QR	PQRD	QRD
QJD	QDP	ZZ0016	QD	PQRM	QRM	QJM	QMP	ZZ0013	QM
X4	AX4	X6POM	X6	AX6	FDP	QZZ	PTMA	BVM	ZZ0020
PTM	PTDA	BVD	ZZ0022	PTD	CX5	X3PP	WP4	X4PRIM	X4POM
BH4	PDLA	X4WTOR	CX4	X4PP	X1				

WYJSCIA WEJSCIA PARAM INTEG + BLOKI MEM FORTRAN DANE  
 130(500) 474(1400) 129(400) 16 + 6 = 22(300) 150(600) 43

ENDJOB

\*\*\* WERSJA 1.0 \*\*\*

/ DIMENSION X1(21),X2(20),Y1(21),Y2(20)  
FIXED N,Q,I,I1,I2,I3,I4,I5

INITIAL  
NOSORT

DELXC=LG/(N-1)  
SINFI=SIN(5.\*2.\*3.1415926/360.)  
X1(1)=DELXC  
DO 200 I=2,21  
200 X1(I)=X1(I-1)+DELXC  
X2(1)=X1(21)+DELXC  
DO 201 I=2,20  
201 X2(I)=X2(I-1)+DELXC  
DO 202 I=1,21  
202 Y1(I)=(X1(I)-X1(11))\*SINFI  
DO 203 I=1,20  
203 Y2(I)=(X2(14)-X2(I))\*Y1(21)/(X2(14)-X1(21))

SCRT

PARAMETER TE=2.2821,D=3.589,GAMMA0=.076694,C=3.655,P0=1.52573  
PARAMETER F=.78,HB=.535,Z1=.549778  
PARAMETER XI=.3989,LSL=1.8809305,LG=3.35585  
PARAMETER N=21,V0=.278,T=.2,KN=.005,XL0=5.536

PARAMETER RAMSIL=3.755,J=3.4E4,FMKA=2.1E5,A=1.856,RAHMKA=2.058,...  
C1=.103,D1=1.2570,FMZP=4.4E4,FMZK=4.4E4,KR=6.57E6,...  
MH=2.67E5,HT1=4.E3,LAMBDA=1.124,KZ=6.E-8,B=.1392,...  
MT2=1.6E4

PARAMETER ZAMRAD=57.2958,HN=.07493  
PARAMETER G00=2.67E-3,F0=3.E4,F01=5.E4  
PARAMETER TIO=.11, TPO=.13, TIP=.125, TIM=.125,...  
DELYL=.01

PARAMETER AALXPL=-1.2E-11,BALXPL=7.2E-6,CALXPL=3.1,...  
ABXPL=9.36E-14,BBXPL=-3.444E-8,CBXPL=-1.82E-4,...  
AALXMI=-2.056E-10,BALXMI=5.028E-5,CALXMI=-3.42,...  
ABXMI=2.658E-13,BBXMI=-1.9487E-7,CBXMI=5.29E-4,...  
AALKPM=2.6E-9,BALKPM=3.82E-4,CALKPM=-50,...  
ABKPMI=-1.136E-11,BBKPMI=-1.856E-6,CBKPMI=-2.48E-2,...  
AKPPL=40.3,BKPPL=3.9E-2

CONSTANT CZASTP=0.

INCON BETPW0=0.,BETPP0=0.,BETP0=.0472844,FIR0=-3.8903E-4,...  
YCR0=-4.4692E-3,X30=.1194

CONSTANT XCH=0.

CONSTANT TGFI=0.,YC=0.,FI=0.

XLDOP=.05\*DELXC  
KSI=ARSIN((P0+HN)/RAMSIL)  
XCO=LG/2  
APB=A+B  
F1=FMKA\*COS(FI-BETP0)\*COS(BETP0)\*B/APB  
F2=KR\*(BETP0+FI)  
LGMC1=LG-C1  
LGMD1=LG-D1  
DELYP=KZ\*((F1\*LGMC1+F2\*D1)/(LG\*COS(FI))+FMZP)  
DELYK=KZ\*((F1\*C1+F2\*LGMD1)/(LG\*COS(FI))+FMZK)  
KRAB=KR\*APB  
DELFI=ATAN((DELYP-DELYK)/(LG\*COS(FI)))  
DELYC=.5\*(DELYP+DELYK)  
FIPDEL=FI+DELFI  
YCMDEL=YC+DELYC

DYNAMIC

```

GAMMA=ATAN(P/TE)
COSFIR=COS(FIR)
XC=INTGRL(XC0,V*COSFIR)
XLH=SQRT(XLEM**2+HLEM**2)
ARHX=ATAN(HLEM/XLEM)+FIR
TP=TE**2+P**2
MI=ALFA1-GAMMA+GAMMA0
LSLMX3=LSL-X3
LMX3KW=LSLMX3*LSLMX3
ALFA1=ARCOS((TP+D*D-LMX3KW)/(2.*D*SQRT(TP)))
FIR=INTGRL(FIR0,(FIPDEL-FIR)/T)
YCR=INTGRL(YCR0,(YCMDEL-YCR)/T)
MIPZ1=MI+Z1
XLEM=C*COS(MI)+F*COS(MIPZ1)-XH
HLEM=HB-C*SIN(MI)-F*SIN(MIPZ1)
XL=XC+XLH*COS(ARHX)
YL=YCR+XLH*SIN(ARHX)
FIRS=FIR*ZAMRAD
BETAPS=BETAP*ZAMRAD

```

```

P=RAMSIL*SIN(KSI-BETAP)+HN

```

```

BETAPU=(FIKA*RAMKA*SIN(LAMBDA-FIR+BETAP)+FRSIL*RAMSIL...
-KRAB*(FIR+BETAP)-MH*BETAP)/J
BETAPP=INTGRL(BETPP0,BETAPU)
BETAP=INTGRL(BETP0,BETAPP)
FRSIL=(FT+MT)*SIN(ALFA1+ALFA2-GAMMA+BETAP+KSI)
MT=MT1+MT2*X3
ALFA2=ARCOS((D*D-TP+LMX3KW)/(2.*D*(LSLMX3)))
XCK=XC-LG*COSFIR/2.
YCK=YCR-LG*SIN(FIR)/2.

```

```

PROCEDURE X3P=X3P(X30,CZASTP,YL,DELYL,Q00,FT,KN,XL,XL0)
IF(TIME.GT.0.)GO TO 50
X3P=X30
50 IF(TIME.LT.CZASTP)GO TO 60
IF(CYL.LT.-DELYL+KN*(XL-XL0))X3P=X3P+...
(AALXPL*FT*FT+BALXPL*FT+CALXPL)*Q00+...
ABXPL*FT*FT+BBXPL*FT+CBXPL+...
(AKPPL*Q00+BKPPL)*(TIP-TI0)
IF(CYL.GT.DELYL+KN*(XL-XL0))X3P=X3P+...
(AALXMI*FT*FT+DALXMI*FT+CALXMI)*Q00+...
ABXMI*FT*FT+BBXMI*FT+CBXMI+...
((AALKPM*FT*FT+BALKPM*FT+CALKPM)*Q00+...
ABKPMI*FT*FT+BBKPMI*FT+CBKPMI)*(TIN-TI0)
CZASTP=CZASTP+TP0
60 CONTINUE
ENDPRO

```

```

X3=INTGRL(X30,(X3P-X3)/(10.*DELT))

```

```

NOSORT

```

```

Q=IFIX(.5*(N-1)*SIN(FI))

```

```

XLP1=XL/DELXC
XLP2=AINT(XLP1)
XLP3=ABS(XLP1-XLP2)
IF(XLP3.GT.XLDOP.AND.1.-XLP3.GT.XLDOP)GO TO 20
I5=IFIX((XL-XC-LG/2)/DELXC)
X2(I5)=XL
Y2(I5)=YL
Y11=Y1(I11)
Y2K=Y2(I5)
I5K=I5

```

```

20 IF(XC-XCM.LT.DELXC)GO TO 10
DO 1 I=1,20
X1(I)=X1(I+1)
Y1(I)=Y1(I+1)

```

```

Y1(21)=Y2(1)

DO 2 I=1,19
X2(I)=X2(I+1)
2 Y2(I)=Y2(I+1)
XCN=XC

SUMAYC=0.
SUMAXY=0.
SUMAX=0.
SUMAY=0.
SUMAX2=0.
I1=1+Q
I2=N-Q
DO 5 I=I1,I2
SUMAYC=SUMAYC+Y1(I)
SUMAXY=SUMAXY+X1(I)*Y1(I)
SUMAX=SUMAX+X1(I)
SUMAY=SUMAY+Y1(I)
5 SUMAX2=SUMAX2+X1(I)*X1(I)
YC=SUMAYC/(N-2*Q)
TGFI=((N-2*Q)*SUMAXY-SUMAX*SUMAY)/((N-2*Q)*SUMAX2-(SUMAX*SUMAX))-
-1.E-20)
FI=ATAN(TGFI)
F1=FMKA*COS(FI-BETAP)*COS(BETAP)*B/APB
F2=KR*(BETAP+FIR)
DELYP=KZ*((F1*LGMC1+F2*D1)/(LG*COS(FI))+FMZP)
DELYK=KZ*((F1*C1+F2*LGMD1)/(LG*COS(FI))+FMZK)
DELFI=ATAN((DELYP-DELYK)/(LG*COS(FI)))
DELYC=.5*(DELYP+DELYK)
FIPDEL=FI+DELFI
YCMDEL=YC-DELYC

```

10 CONTINUE

TERMINAL

```

TIMER FINTIM=101.,DELT=1JE-3,PRDEL=.1
METHOD SIMP
PRINT XC,FIRS,BETAPS,XCK,YCK,XL,YL,X3
TITLE CIAGNIK NA TRASIE
END
STOP

```

SEKCJA ZMIENNYCH WYJSCJOWYCH

DEL	SINFI	ZZ0001	XLDOP	KSI	XC0	APB	KRAB	LGMD1	F2
F1	DELYK	LGMC1	DELYP	DELFI	FIPDEL	DELYC	YCMDEL	COSFIR	V
ZZ0003	XC	ZZ0005	FIR	ZZ0007	YCR	P	GAMMA	LSLMX3	LMX3KW
TP	ALFA2	ALFA1	MT	FT	FRSIL	BETAPW	BETAPP	BETAP	MI
HIPZ1	XLEM	HLEM	ARHX	XLH	XL	YL	X3P	ZZ0011	X3
FIRS	BETAPS	XCK	YCK	Q	XLP1	XLP2	XLP3	ZZ0012	I5
Y11	Y2K	I5K	XCM	SUMAYC	SUMAXY	SUMAX	SUMAY	SUMAX2	I1
Z2	SUMAYC	SUMAXY	SUMAX	SUMAY	SUMAX2	YC	TGFI	FI	F1
F2	DELYP	DELYK	DELFI	DELYC	FIPDEL	YCMDEL			

PARAMETRY NIE SA WEJSCIEM LUB WYJSCIEM, NIEDOSTEPNE DLA SEKCJI SORT\*\*\*USTAWIONE NA 3

WYJSCIA	WEJSCIA	PARAM	INTEG	+ BLOKI	MEM	FORTRAN	DANE
01(500)	248(1400)	77(400)	6	+	0 =	6(300)	121(600) 29

ENDJOB