

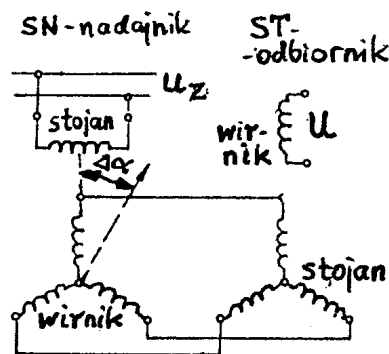
Katedra Automatyki i Biomechaniki P.Ł.
LABORATORIUM PODSTAW AUTOMATYKI
Ćwiczenie C: *Układ przekazywania położenia*
(*selsynowy układ nadążny*)

11. UKŁAD NADAŻNY

Układy nadążne są to zamknięte układy sterowania, w których wielkość wiodąca zmienia się w nieznaną dokładnie z góry sposób. Wielkość regulowana nadąża za zmieniającą się wielkością wiodącą. Omówiony zostanie układ służący do przekazywania kąta (położenia kąтового) na odległość. Zasadniczymi elementami tego układu są: selsynowe łącze transformatorowe, wzmacniacz, silnik wykonawczy.

11.1. Selsynowe łącze transformatorowe

Zadaniem selsynowego łącza transformatorowego, składającego się z selsyna nadawczego i selsyna transformatorowego jest przekazywanie na drodze elektrycznej różnicy położenia kątowych wałów tych selsynów (rys. 11.1). Jeżeli połączy się trójfazowe uzwojenie wirnika SN z trójfazowym uzwojeniem stojana ST i zasili uzwojenie wzbudzenia SN napięciem przemiennym U_z , wówczas SEM powstająca w uzwojeniu wtórnym ST jest zależna od kąta rozbieżności położenia wałów obu selsynów. Prąd przemienny płynący w uzwojeniu wzbudzenia selsyna nadawczego wytwarza strumień magnetyczny, który na skutek działania transformatorowego indukuje w uzwojeniach wirnika napięcia przemiennie o wartościach zależnych od położenia wirnika względem osi uzwojenia wzbudzającego (względem stojana). Napięcia te powodują



Rys. 11.1

przepływ prądów w uzwojeniach stojana ST, które z kolei wytwarzają strumień magnetyczny indukujący w uzwojeniu wirnika napięcie u . Gdy łącze jest w położeniu jak na rys. 11.1, tzn. gdy wirnik ST nie jest położony identycznie jak stojan i wirnik SN, ale obrócony przestrzennie o 90° , wtedy napięcie u równe jest zero. Gdy teraz wychylimy wirnik selsyna nadawczego SN o kąt $\Delta\alpha$ względem tego zerowego położenia, wtedy na wirniku selsyna odbiorczego ST powstanie napięcie przemiennie u o amplitudzie określonej wzorem

$$U = U_m \sin \Delta\alpha \quad (11.1)$$

gdzie U_m jest wartością dla $\Delta\alpha = +90^\circ$.

Wprowadzając

$$\frac{\Delta U}{U_0} = x_2 \quad \text{i} \quad \frac{\Delta U_s}{U_{s0}} = y_2,$$

gdzie U_{s0} - wzmacnione napięcie przy kącie rozbieżności $\frac{\pi}{6}$, otrzymamy wzór na przepustowość wzmacniacza

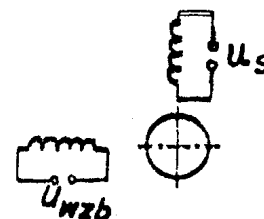
$$G_2(p) = \frac{y_2}{x_2} = k_2, \quad (11.3)$$

gdzie

$$k_2 = k'_2 \frac{U_0}{U_{s0}} = \frac{\Delta U_s}{\Delta U} \frac{U_0}{U_{s0}}.$$

11.3. Silnik wykonawczy

Członem wykonawczym jest dwufazowy silnik asynchroniczny (DSA), szeroko stosowany w układach automatyki (rys. 11.3). Na stojanie silnika znajdują się dwa uzwojenia przesunięte względem siebie o 90° i wytwarzające dwa prostopadłe strumienie magnetyczne. W żłobkach wirnika są umieszczone pręty miedziane stanowiące uzwojenie zwarte typu klatkowego. Uzwojenia stojana są zasilane napięciami przemiennymi przesuniętymi względem siebie w fazie o 90° . Powstaje wtedy w szczelinie powietrznej wirujące pole magnetyczne. Strumień magnetyczny przecinając przewody wirnika indukuje w nich prądy. Współdziałanie tych prądów ze strumieniem magnetycznym wytwarza moment obrotowy o kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola magnetycznego.



Rys. 11.3

Dla uzyskania wirującego pola kołowego (największego momentu) muszą być spełnione następujące warunki:

- uzwojenia sterujące i wzbudzające powinny być przesunięte względem siebie o 90° ,
- przesunięcie fazowe między napięciami zasilającymi uzwojenie wzbudzające i sterujące powinno wynosić 90° (osiąga się to za pomocą kondensatora lub przesuwnika fazowego),
- przepływy obydwu uzwojeń powinny być sobie równe ($I_{wzb.} Z_{wzb.} = I_s Z_s$).

Niespełnienie jednego z tych warunków powoduje powstanie pola eliptycznego (mniejszy moment).

Silnik DSA posiada szereg zalet: łatwa regulacja prędkości obrotowej za pomocą zmiany amplitudy napięcia sterującego, zmiany fazy tego napięcia lub jednoczesnej zmiany obu tych parametrów; możliwość zmiany kierunku obrotu przez zmianę fazy jednego z napięć o 180° ; silnik jest samohamowny, tzn. po zaniku napięcia sterującego jest on hamowany elektrycznie; małe napięcie rozruchu, gdyż są małe opory tarcia (brak szczotek, precyzyjne łożyska); prosta konstrukcja.

11.4. Przepustowość silnika

Pojęcie przepustowości ma sens w układach liniowych, jednak i dla urządzenia nieliniowego (jakim jest silnik DSA) można w przybliżeniu wyznaczyć przepustowość, jeżeli obierze się punkt pracy (stan ustalony), a zakres zmian wielkości wejściowej i wyjściowej jest dostatecznie mały.

Charakterystykę mechaniczną silnika można zapisać następująco [1]

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta\omega \approx \left(\frac{\partial\omega}{\partial U_s}\right)_0 \Delta U_s + \left(\frac{\partial\omega}{\partial M}\right)_0 \Delta M, \quad (11.4)$$

gdzie: $\left(\frac{\partial\omega}{\partial U_s}\right)_0 = a$ i $\left(\frac{\partial\omega}{\partial M}\right)_0 = -b$ - współczynniki obliczone w punkcie pracy,

$\Delta\omega, \Delta U_s$ i ΔM - małe zmiany prędkości, napięcia sterującego i momentu w pobliżu punktu pracy.

W celu obliczenia współczynników a i b często stosuje się metodę polegającą na zastąpieniu rzeczywistych charakterystyk mechanicznych silnika, zbiorem prostych równoległych [4] (patrz rys. 11.4). Przyjmując, że moment obrotowy jest równoważony jedynie przez moment dynamiczny, tzn.

$$M = B \frac{d^2\alpha}{dt^2},$$

można napisać, że

$$\frac{d\Delta\alpha}{dt} = \left(\frac{\partial\omega}{\partial U_s}\right)_0 \Delta U_s + \left(\frac{\partial\omega}{\partial M}\right)_0 B \frac{d^2\Delta\alpha}{dt^2}, \quad (11.5)$$

gdzie $\Delta\alpha = \alpha_2$ jest mierzone z położenia równowagi.

Wprowadzając zmienne bezwymiarowe:

$$\frac{\Delta U_s}{U_{s0}} = x_3 \quad \text{i} \quad \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = y_3 \quad (11.6)$$

oraz oznaczając:

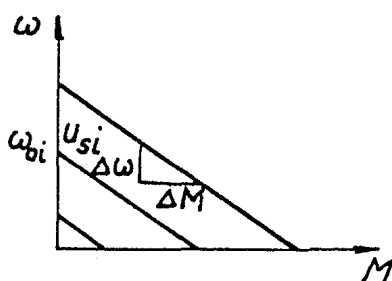
$$-\left(\frac{\partial \omega}{\partial M}\right)_0 B = T_m \quad \text{i} \quad \left(\frac{\partial \omega}{\partial U_s}\right)_0 \frac{U_{s0}}{\omega_0} = k_3, \quad (11.7)$$

otrzymuje się równanie charakterystyki mechanicznej silnika w postaci

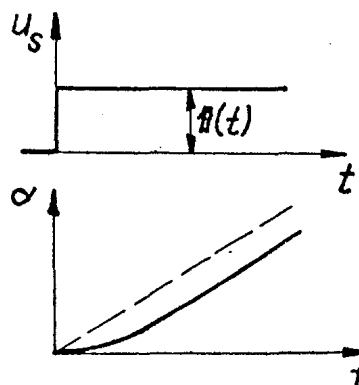
$$p(T_m p + 1)y_3 = k_3 x_3; \quad (11.8)$$

przepustowość operatorowa silnika

$$W_3(p) = \frac{y_3}{x_3} = \frac{k_3}{p(T_m p + 1)}. \quad (11.9)$$



Rys. 11.4



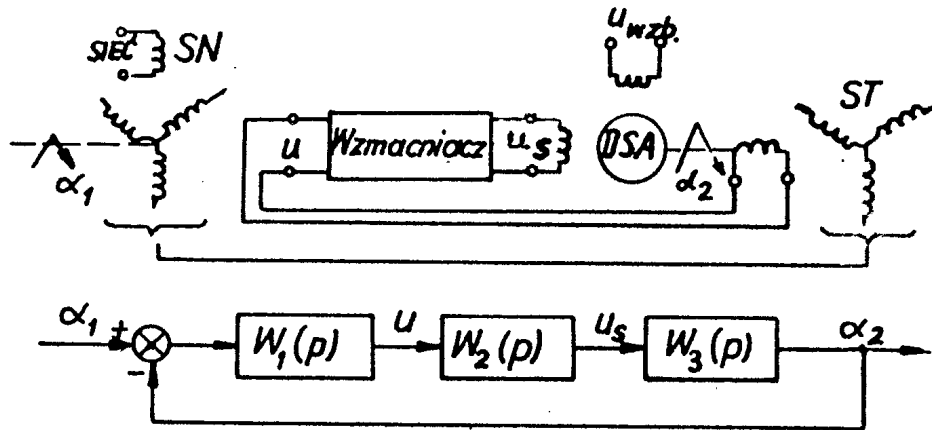
Rys. 11.5

Na rysunku 11.5 przedstawiono odpowiedź jednostkową silnika. Silnik można więc traktować jako człon całkujący rzeczywisty.

11.5. Układ przekazywania położenia

Zadaną wielkość wejściową - kąt α_1 wprowadza się na wał SN (rys. 11.6). Wielkością wyjściową jest kąt α_2 wału silnika i sprzężonego z nim mechanicznie selsyna transformatorowego ST. Łącze selsyno-

we spełnia rolę detektora uchybu między kątami α_2 i α_1 . Wzmocnione napięcie z ST powoduje przepływ prądu w uzwojeniu sterującym DSA (uzwojenie wzbudzające jest zasilane napięciem znamionowym), silnik obraca się, aż do wyrównania kątów α_2 i α_1 .



Rys. 11.6

Przepustowość układu (rys. 11.6) wynosi

$$\begin{aligned}
 W(p) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} &= \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{k_1 k_2 k_3}{T_m p^2 + p + k_1 k_2 k_3} = \\
 &= \frac{1}{T^2 p^2 + 2 \xi T p + 1}, \quad (11.10)
 \end{aligned}$$

gdzie stała czasowa

$$T = \sqrt{\frac{T_m}{k_1 k_2 k_3}} \quad (11.11)$$

oraz względny współczynnik tłumienia

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{T_m k_1 k_2 k_3}}. \quad (11.12)$$

Rozpatrzmy następujące trzy przypadki:

a) $\xi > 1$;

równanie charakterystyczne ma pierwiastki rzeczywiste ujemne:

$$p_1 = -\frac{1}{T} \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right), \quad (11.13a)$$

$$p_2 = -\frac{1}{T} \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right), \quad (11.13b)$$

a odpowiedź skokowa ma postać

$$\alpha_2(t) = \alpha_1 \left(1 - \frac{p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}}{p_2 - p_1} \right) \mathbb{1}(t), \quad (11.14)$$

a więc przy współczynniku tłumienia $\xi > 1$ układ ma charakter członu inercyjnego II rzędu;

b) $\xi = 1$;

równanie charakterystyczne ma pierwiastek podwójny

$$p_{1,2} = -\frac{1}{T}, \quad (11.15)$$

a odpowiedź skokowa ma postać

$$\alpha_2(t) = \alpha_1 \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T} \right) e^{-\frac{t}{T}} \right] \mathbb{1}(t); \quad (11.16)$$

c) $\xi < 1$;

w tym przypadku pierwiastki równania charakterystycznego są zespolone o częściach rzeczywistych ujemnych:

$$p_1 = -\frac{1}{T} \left(\xi - j \sqrt{1 - \xi^2} \right), \quad (11.17a)$$

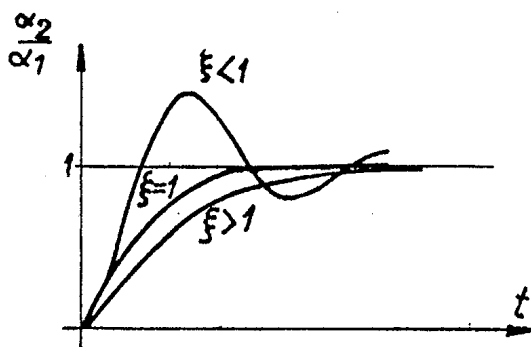
$$p_2 = -\frac{1}{T} \left(\xi + j \sqrt{1 - \xi^2} \right); \quad (11.17b)$$

układ ma charakter członu oscylacyjnego, a odpowiedź skokowa ma postać

$$\alpha_2(t) = \alpha_1 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T} t} \sin \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} t + \varphi \right) \right] \mathbb{1}(t), \quad (11.18)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}. \quad (11.19)$$

Stała czasowa T i względny współczynnik tłumienia ξ zależą od współczynników k_1, k_2, k_3 i stałej czasowej silnika T_m . Zmieniając współczynnik wzmocnienia k_2 wzmacniacza, można uzyskać różne wartości współczynnika ξ , a więc różne rodzaje przebiegów (rys. 11.7). Przy $\xi < 1$ przebieg jest oscylacyjny gasnący, przy $\xi > 1$ - aperiodyczny, a przy $\xi = 1$ aperiodyczny krytyczny. Na podstawie analizy przepusto-



Rys. 11.7

wości (ujemne części rzeczywiste biegunów) wynika, że omawiany układ jest stateczny. Jednak po przekroczeniu pewnej wartości współczynnika wzmocnienia można zaobserwować niestateczność układu. Stałoby się to widoczne, gdyby nie czynić uproszczeń, które doprowadziły do uzyskania równania charakterystycznego drugiego rzędu. Rzeczywiste układy są opisane równaniami charakterystycznymi wyższego rzędu, wtedy pojawia się zawsze niestateczność dla wartości wzmocnienia powyżej określonego maksimum.

LITERATURA

- [1] P a r s z e w s k i Z.: Teoria maszyn i mechanizmów, WNT, wyd. IV. Warszawa 1978.
- [2] P a r s z e w s k i Z., R o s z k o w s k i M.: Podstawy automatyki dla mechaników. PWN, Warszawa 1976.
- [3] B r o w n G. S., C a m p b e l l D. P.: Zasady serwomechanizmów. PWN, Warszawa 1957.
- [4] G i b s o n J. E., T u t e u r F. B.: Człony układów regulacji. WNT, Warszawa 1961.
- [5] K r a s o w s k i A. A., P o s p i e ł o w G. S.: Podstawy automatyki i cybernetyki technicznej. WNT, Warszawa 1965.

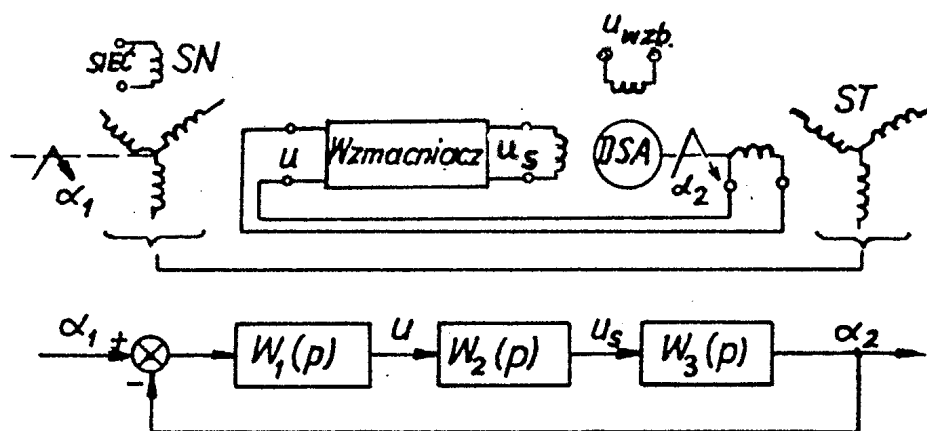
Ć w i c z e n i e II.4

BADANIE UKŁADU PRZEKAZYWANIA POŁOŻENIA

Cel ćwiczenia: zapoznanie się z modelowym zamkniętym układem przekazywania położenia oraz wyznaczenie przepustowości operatorowych (transmitancji) poszczególnych elementów i całego układu.

II.4.1. Opis urządzenia pomiarowego

Omawiany układ służy do przekazywania kąta obrotu na odległość. Jego schemat ideowy i blokowy podano na rysunku II.4.1. Zasadniczymi elementami układu są: selsynowe łącze transformatorowe, wzmacniacz, silnik dwufazowy.



Rys. II.4.1

Selsynowe łącze transformatorowe służy do zamiany różnicy kątowej $\Delta\alpha$ dwóch wałów (wału selsyna nadawczego i wału selsyna transformatorowego) na sygnał elektryczny. Dla niewielkiej różnicy kątowej wartość napięcia z selsyna transformatorowego jest proporcjonalna do $\Delta\alpha$, a przy zmianie znaku $\Delta\alpha$ faza napięcia zmienia się o 180° . Dla małych częstotliwości ruchu obrotowego łącza w porównaniu z częstotliwością napięcia zasilającego selsyn nadawczy i dla małych kątów $\Delta\alpha$, można prze-

pustowość selsynowego łącza transformatorowego przedstawić jak dla członu proporcjonalnego (rozdział 11), a więc

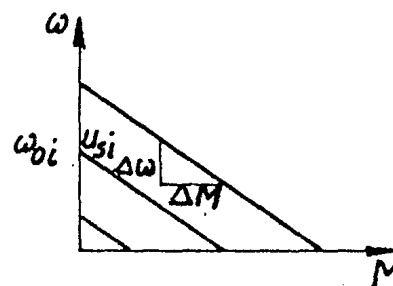
$$G_1(p) = k_1.$$

Zastosowanie wzmacniacza umożliwia uzyskanie dostatecznej mocy potrzebnej doysterowania silnika. Dla liniowego zakresu pracy, wzmacniacz można traktować jako człon proporcjonalny, a zatem jego przepustowość

$$G_2(p) = k_2.$$

Przepustowość silnika można wyznaczyć na podstawie linearyzowanych charakterystyk mechanicznych - rys. II.4.2 (rozdział 11)

$$G_3(p) = \frac{k_3}{p(T_m p + 1)}.$$



Rys. II.4.2

Wielkość zadana α_1 jest to kąt obrotu wału SN (rys. II.4.1). Wielkością wyjściową jest α_2 - kąt obrotu wału silnika i sprzężonego z nim mechanicznie wirnika ST. Łącze SN-ST spełnia rolę detektora uchybu między kątami α_2 i α_1 . Po zmianie kąta α_1 , wzmożone napięcie z ST powoduje przepływ prądu w uzwojeniu sterującym silnika i silnik obraca się aż do wyrównania kątów.

II.4.2. Wprowadzenie teoretyczne

Szczegółowy opis układu i jego elementów znajdzie czytelnik w rozdziale 11.

II.4.3. Przebieg ćwiczenia

1. Zmierzyć wartość napięcia U na uzwojeniu jednofazowym selsyna transformatorowego dla kilku wartości $\Delta\alpha$ w granicach $\pm 60^\circ$. Na podstawie pomiarów wykreślić charakterystykę $U = f(\Delta\alpha)$. Dla części prostopadkowej wyznaczyć przepustowość łącza. Porównać fazę U dla kątów $+\Delta\alpha$ i $-\Delta\alpha$ na oscyloskopie katodowym.

2. Zmierzyć wartość napięcia wyjściowego wzmacniacza dla kilku wartości napięcia wejściowego; wykreślić charakterystykę $U_s = f(U)$; wyznaczyć przepustowość wzmacniacza.

3. Wyznaczyć charakterystykę sterowania silnika $n = f(U_s)$. Na podstawie pomiarów, linearyzowanych charakterystyk mechanicznych i podanego momentu bezwładności wyznaczyć przepustowość silnika.

4. Obliczyć przepustowość układu przekazywania położenia.

5. Porównać zachowanie się układu dla różnych współczynników wzmocnienia wzmacniacza.

6. Zarejestrować przebieg odpowiedzi skokowej dla układu o charakterze oscylacyjnym i aperiodycznym.

II.4.4. Literatura

- [1] P a r s z e w s k i Z., R o s z k o w s k i M.: Podstawy automatyki dla mechaników. PWN, Warszawa 1976.
- [2] B r o w n G. S., C a m b e l l D. P.: Zasady serwomechanizmów. PWN, Warszawa 1957.
- [3] G i b s o n J. E., T u t e u r F. B.: Człony układów regulacji. WNT, Warszawa 1961.
- [4] Elektromaszynowe elementy automatyki - katalog. WEMA, Warszawa 1969.

WZÓR SPRAWOZDANIA

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyki $U = f(\Delta\alpha)$

Δα	[deg]	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
U	[V]									

Przepustowość łącza transformatorowego:

$$W_{sLT}(p) [V/rad] = k_1 = \frac{\Delta U}{\Delta \alpha} =$$

3. Charakterystyki $U_s = f(U)$

U	[V]									
U _s	[V]	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Przepustowość wzmacniacza:

$$W_{wzm}(p) [V/V] = k_2 = \frac{\Delta U_s}{\Delta U} =$$

4. Charakterystyki $\omega = f(U_s)$

n	[obr/s]								
ω	[rad/s]								
U _s	[V]								

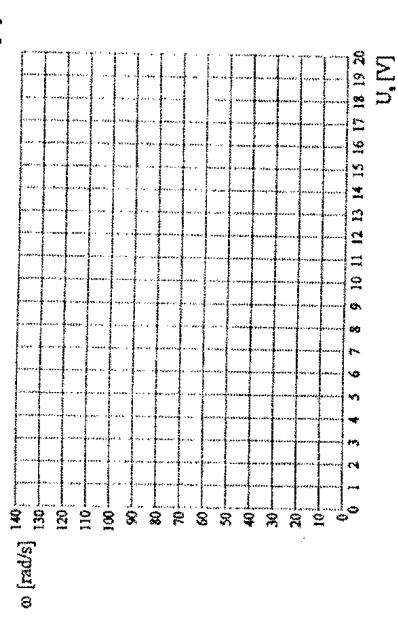
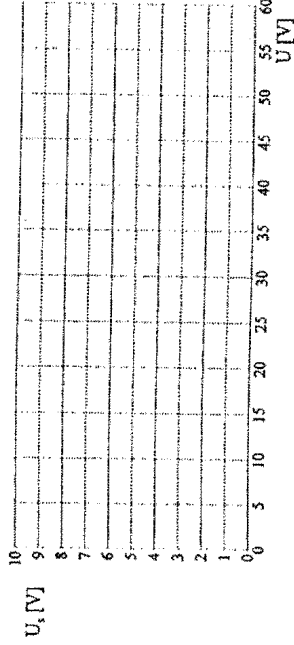
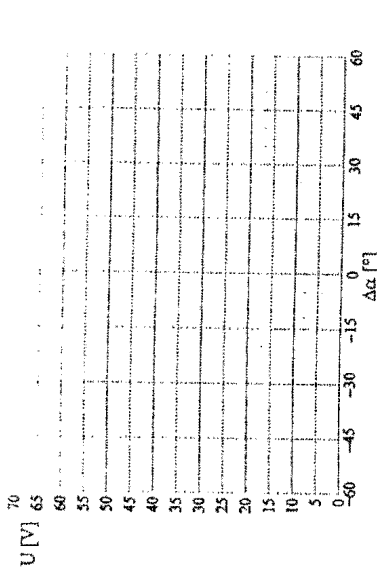
B = 0,11 [G·cm·s²]

$$k_3 [rad/(Vs)] = \left(\frac{\partial \omega}{\partial U_s} \right)_0 =$$

$$T_m [s] = -B \left(\frac{\partial \omega}{\partial M} \right)_0 =$$

Przepustowość silnika:

$$W_{Dsa}(p) [rad/V] = \frac{k_3}{p(T_m p + 1)} =$$



5. Przepustowość układu zamkniętego

$$W(p) [rad/rad] = \frac{W_{sLT}(p) \cdot W_{wzm}(p) \cdot W_{Dsa}(p)}{1 + W_{sLT}(p) \cdot W_{wzm}(p) \cdot W_{Dsa}(p)} =$$

$$T [s] = \xi =$$