

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW  
MERA-PIAP  
Al. Jerozolimskie 202 02-222 Warszawa Telefon 23-70-81

074

OŚRODEK AUTOMATYKI ELEKTRYCZNEJ

Zespół Budowy Autonomicznych Urządzeń Automatyki

A

Główny wykonawca mgr inż. Marek Wójcik

*Wójcik*

Wykonawcy mgr inż. M. Wójcik

POWFNE  
eqz Nr.

Konsultant

Nr zlecenia  
UR.01.03.02 A

Opracowanie silników prądu stałego  
z komutacją elektroniczną  
Etap 1d.

Opracowanie programu badań  
i badanie modelu laboratoryjnego

Zleceniodawca Problem węzłowy 06.6

Pracę rozpoczęto dnia 10.12.83r.

Kierownik Zespołu

mgr inż. M. Wróbel

p.o. Z-cy Dyr. d/s  
Automatyki

*Galazka*  
dr inż. T. Galazka

zakończono dnia 20.12.83 r.

Kierownik Ośrodka

prof. dr inż. T. Miśsała

Praca zawiera:

Rozdzielnik - ilość egz:

stron 14

Egz. 1 BOINTE

rysunków 6

Egz. 2 OAE

fotografii

Egz. 3 OAE

tabel

Egz. 4

tablic 3

Egz. 5

załączników

Egz. 6

Nr rejestr. 5182

Analiza deskryptorowa / ~~NAPEŁDY + SILNIKI PRĄDU STAŁEGO + BADANIA~~ /

Analiza dokumentacyjna Opis działania silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną.  
Wyniki badań modelu laboratoryjnego.

Tytuły poprzednich sprawozdań

- Nr 5026 "Opracowanie silników prądu stałego z komutacją elektroniczną. Etap 1a. Opracowanie założeń".
- Nr. 5151 "Opracowanie silników prądu stałego z komutacją elektroniczną. Etap 1d. Opracowanie programu badań, i badanie modelu laboratoryjnego. Program badań"

621.314.2 Silniki prądu stałego  
62-8 Napęd

SPI'S TRESCI

1. Wstęp
2. Budowa silnika
3. Zasada działania
4. Wyniki badań
5. Wnioski i zalecenia

## 1. WSTĘP

### 1.1. Dokumenty

Badania zostały przeprowadzone w oparciu o dokumenty:

- sprawozdanie m. SISA „Dymalowanie silników prądu stałego z komutacją elektroniczną. Etap 1d. Dymalowanie programu badań i badanie modelu laboratoryjnego. Program badań”.
- dokumentacja na roboty IRb-6
- katalog firmy AXEM-CEM. Silniki tarcowe prądu stałego.

### 1.2. Przedmiot badań

Badaniom poddano jeden z dwóch egzemplarzy modelu laboratoryjnego oznaczonego umownie  $I$  (silnik z mniejszą objętością magnesów na wirniku). Zrezygnowano z badań modelu  $II$  (model z większą objętością magnesów na wirniku) z powodu, że przyjęta konstrukcja uniemożliwiła uzyskanie szczeliny poniżej 8 mm.

### 1.3. Zakres badań.

Z uwagi na fakt, że po namagnesowaniu magnesów pojawił się moment reluktancyjny (wirnik zajmuje określone położenia ze znacznym momentem trzymającym) oraz że przyjęta konstrukcja uniemożliwiła po namagnesowaniu utrzymanie założonej szczeliny  $2 \times 0,4$  mm i zaistniała konieczność znacznego napięcia żołysek kulkowych w kierunku osiowym (duży moment oporowy żołysek) zakres badań ograniczono do następujących pomiarów:

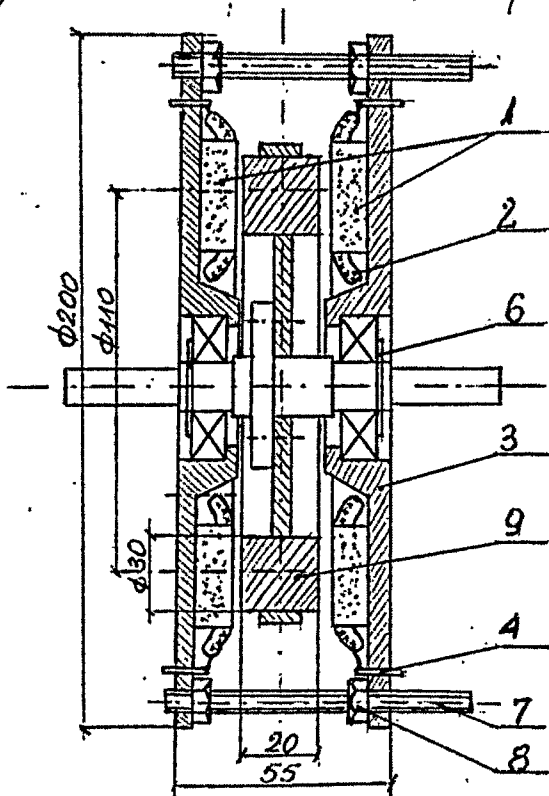
- wyznaczenie momentu bezładności wirnika.

- pomiar szczeliny
- wyznaczenie charakterystyki mechanicznej  $M = f(n)$   
 $\bar{I}_f = f(n)$   $P_1 = f(n)$   $P_2 = f(n)$   $\eta = f(n)$ .
- wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego  $n = f(u)$
- wyznaczenie stałych napięcia i momentu
- wyznaczenie momentu rozruchowego
- wyznaczenie momentu oporowego  $T_{oiysk}$
- wyznaczenie momentu reaktancyjnego (trzymającego)
- przeprowadzenie bilansu strat.

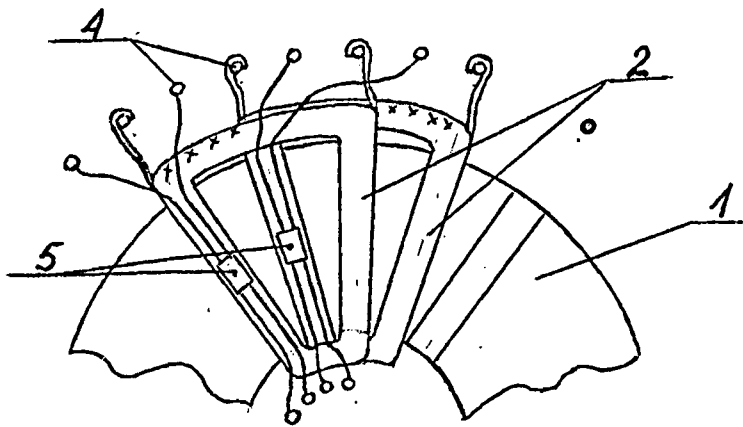
## 2. BUDOWA SILNIKA

Budowę silnika przedstawiono na rys 2.1. Silnik składa się z dwóch tarcz magnetycznych 1 wykonanych z materiału (proszku) magnetycznego metodą prasowania. Materiał ten spełnia rolę blach elektrotechnicznych (w silnikach konwencjonalnych) mających za zadanie ograniczenie strat od prądów wirujących w żelazie. W tarczach magnetycznych umieszczone jest uzwojenie 2, dwufazowe, cewki profilowane rys. 2.2. W każdej cewce jest pięć zwojów namotanych drutem DKE155-1,55. Końce każdej z cewek zostały wyprowadzone na zewnętrznej tarczy żelazkowej 3 izolowanymi od niej kołkami 4. Umożliwiło to swobodne toczenie poszczególnych cewek w obrotach faz  $\Phi$  i  $\Phi^2$ . Czujniki hallotronowe 5 mające za zadanie śledzenie położenia wirnika oraz sterowanie przepływem prądu w uzwojeniu silnika zostały umieszczone w dwóch żyłkach

należących do różnych faz t.j. są przesunięte o  $90^\circ$  el.  
W tarczach Torystkowych 3 osadzone są Torystka kulkowe  
zabezpieczone pierścieniami osadowymi 6. Tarcze Torystkowe  
rozparte są szpilkami 7. Przyjęcie takiej konstrukcji umożliwiło  
magniesowanie magnesów kirkowa w stanie, kiedy obie  
tarcze magnetyczne opierają się na magnesach kirkowa.  
Po namagniesowaniu rozpierano tarcze torystkowe nakrętkami 8  
na szpilkach 7, do momentu kiedy luz osiowy Torystek  
zostanie skasowany. Wewnętrzne bieżnie Torystek opierają się  
kiedy o pierścienie osadowe. Wielkość szczeliny robowej  
silnika regulowana jest podkładkami dystansowymi  
umieszczanymi między pierścieniem osadowym a wewnętrzną  
bieżnią Torystek.  
Tarcza kirkowa z magnesami 9 przykręcona jest nakrętkami  
do kołnierza, stanowiącego integralną część HBT silnika.  
Na rys 2.1. podano zarysowe wykonanie silnika i jego  
elementów.



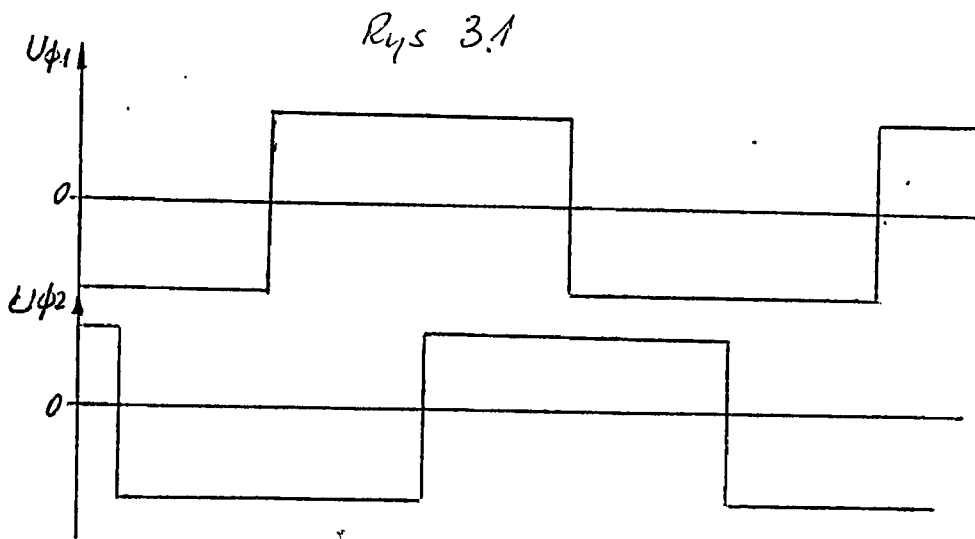
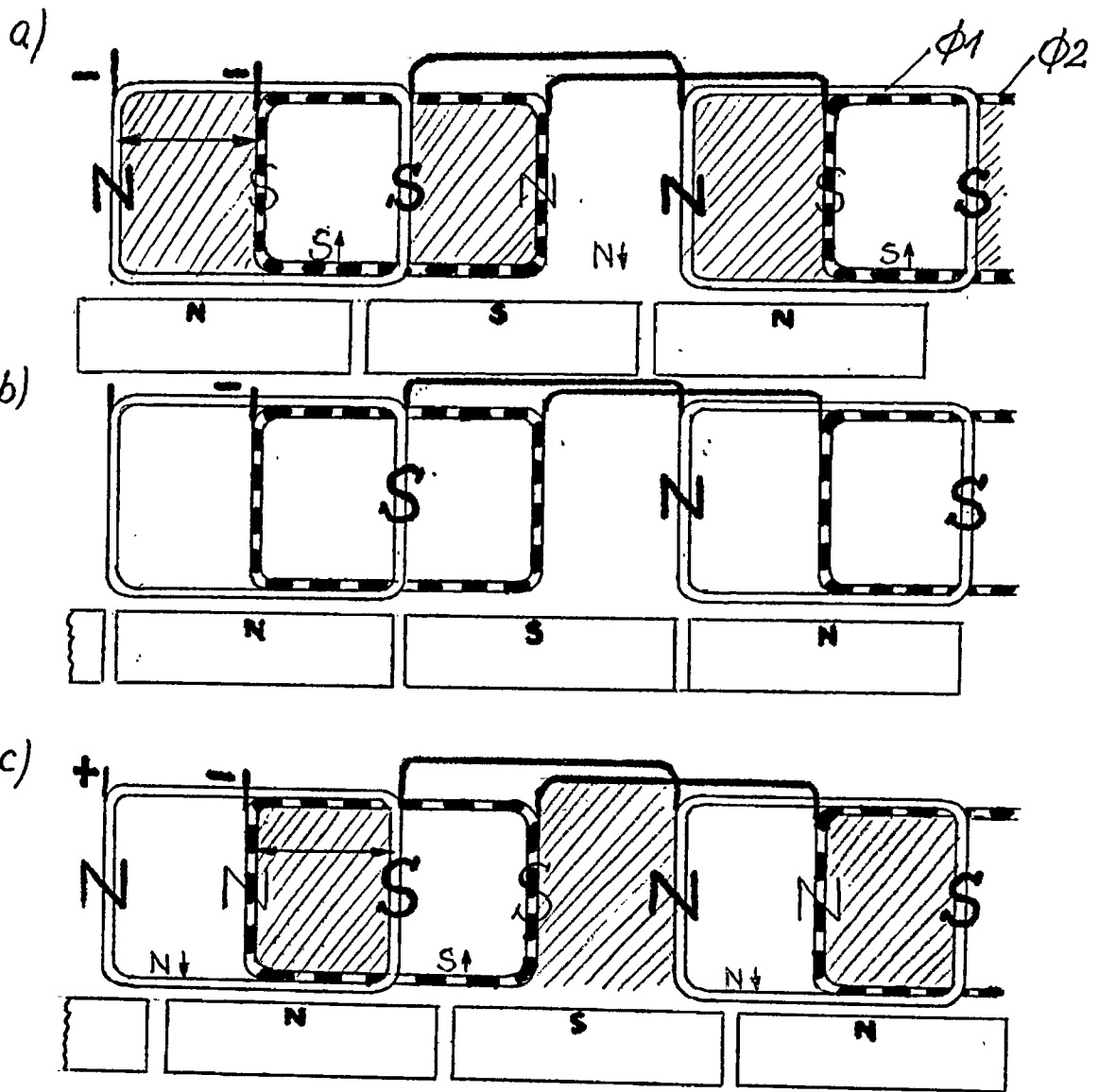
Rys 2.1.



Rys 2.2

### 3. ZASADA DZIAŁANIA.

Zasadę działania silnika ilustruje rys 3.1. Na rys 3.1a pokazano w jaki sposób powstaje moment obrotowy w chwili przed komutacją. Silnik zasilany jest napięciem z komutatora elektronicznego o przebiegu jak na rys 3.2. Wtasciwy istnieją dwie fazy napięcia przesunięte względem siebie o  $\frac{\pi}{2}$ . W chwili przed komutacją (rys 3.1a) obie fazy  $\Phi 1$  i  $\Phi 2$  zasilone są napięciem o ujemnej polaryzacji. Faza  $\Phi 1$  na skutek przepływającego w niej prądu wytwarza odpowiednio bieguny N i S. Magnes o biegunowości jak na rysunku przyciągane są. Natomiast faza  $\Phi 2$  wytwarza swoje bieguny **N** i **S**. W obszarze zakreślonym strumienie od przepływu w fazach znoszą się natomiast w obszarach niezakreślonych dodają się i tworzą wypadkowy strumień o biegunowości odpowiednio S lub N oznaczone strzałką. Magnes wirnika o biegunowości jak na rysunku przyciągane są pod wypadkowe bieguny utworzone przez uwojenia obu faz. I tak magnes o biegunowości N przyciągany jest pod wypadkowy



Rys. 3.2



Biegum  $S\uparrow$ , zaś odpychany jest od poprzedzającego go biegu wypadkowy  $N\downarrow$ . Siła działająca na magnes jest stała w całym zakresie ruchu a więc i moment obrotowy ma wartość stałą, na odcinku oznaczonym  $\longleftrightarrow$ .

W chwili kiedy ten sam magnes  $N$  znajduje się w położeniu jak na rys 3.1 b następuje komutacja prądu w uzwojeniu fazy  $\Phi 1$ . Istnieje więc moment w którym prąd w uzwojeniu fazy  $\Phi 1$  nie płynie, zaś faza  $\Phi 2$  zasilana napięciem o polaryzacji takiej samej jak poprzednio, a więc ujemnej, wytwarza strumień o takiej samej wartości jak ~~ten~~ strumień wypadkowy przed komutacją. Biegum  $N$  magnesem będzie przyciągany do biegunca  $S$  wytworzonego przez uzwojenie fazy  $\Phi 2$  i jednocześnie odpychany od poprzedzającego go biegunca  $N$ . Moment obrotowy porostaje bei zmian w stosunku do momentu obrotowego jaki powstawał w chwili przed komutacją.

W chwili po komutacji - rys 3.2 c, uzwojenia wytworzą biegunny jak na rysunku i magnes o biegunowości  $N$  będzie przyciągany do wypadkowego biegunca  $S\uparrow$  i jednocześnie odpychany od poprzedzającego go biegunca  $N\downarrow$ . Siła działająca na magnes będzie miała wartość stałą na drodze oznaczonej  $\longleftrightarrow$  czyli do następnego momentu komutacji.

Poleżenie wirnika z magnesami względem uzwojenia jest identyfikowane przy pomocy hallotronów, które sterują tranzystorami podającymi prąd o odpowiedniej polaryzacji do każdej z faz.

## 4. WYNIKI BADANÍ.

### 4.1. Wyznaczenie momentu bezwładności wirnika

Moment bezwładności wyznaczono przyjmując, że cały ciężar wirnika skupiony jest w magnesach. Wtedy moment zamachowy

$$GD^2 = 1,9 \cdot 0,11^2 = 0,01694 \text{ kcm}^2$$

a moment bezwładności

$$J = \frac{GD^2}{4} = \frac{0,01694}{4} = 0,004235 \text{ kgm}^2 = 42350 \cdot \text{gem}^2$$

### 4.2. Pomiar szczeliny

Pomiaru dokonano szczerinomiernem wyznaczając wartości maksymalne i minimalne, po obu stronach wirnika.

$$\delta_{1\min} = 0,85 \text{ mm} \quad \delta_{1\max} = 1,2 \text{ mm} \quad \delta_1 \approx 1,2 \text{ mm}$$

$$\delta_{2\min} = 1 \text{ mm} \quad \delta_{2\max} = 1,6 \text{ mm} \quad \delta_2 = 1,4 \text{ mm}$$

### 4.3. Wyznaczenie charakterystyki mechanicznej

Charakterystykę mechaniczną wyznaczono zasilając silnik napięciem

$U_{\phi 1} = U_{\phi 2} = 15 \text{ V}$ , i obciążając silnik momentem hamującym z hamownicy indukcyjnej. Wyniki pomiarów zestawiono w tabelicy 4.3

Wartości  $P_1$ ,  $P_2$  i  $\eta$  wyznaczono z zależności:

moc wydana  $P_2 = 1,0314 \cdot n \text{ [W]} \text{ (przyjmując } 1 \text{ kg} = 10 \text{ N)}$

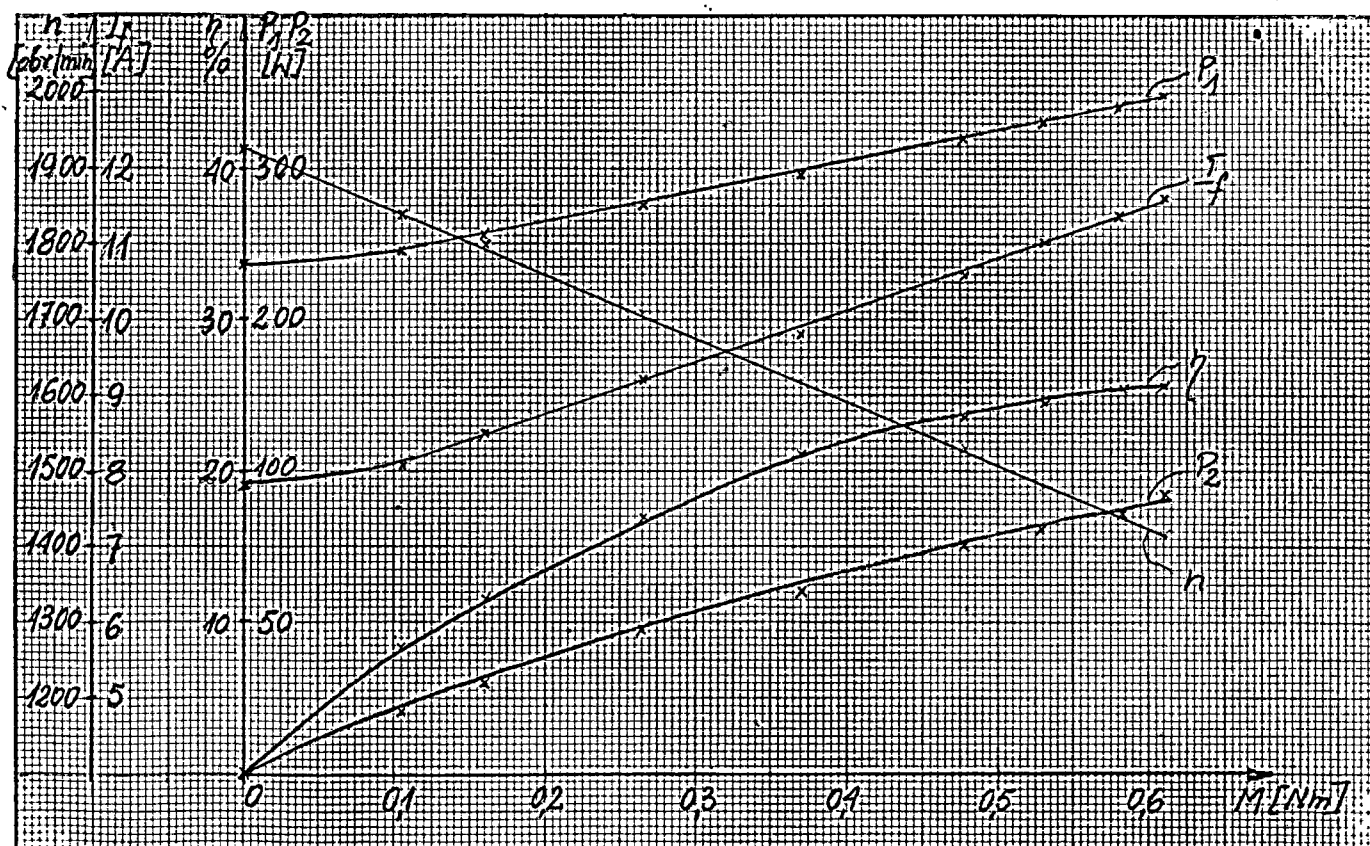
moc pobrana  $P_1 = 2 \cdot I_{\phi 1} \cdot U_{\phi 1} \text{ [W]}$

sprawność  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \text{ [%]}$

Charakterystyki przedstawiono na rys 4.3

Tablica 4.3

M	N <sub>m</sub>	0	0,106	0,159	0,265	0,371	0,477	0,53	0,583	0,61
n	obr/min	1928	1840	1800	1710	1620	1530	1480	1440	1415
I <sub>φ<sub>1</sub></sub>	A	7,8	8,1	8,5	9,2	9,8	10,6	11,0	11,4	11,6
P <sub>1</sub>	W	234	243	255	276	294	318	330	342	348
P <sub>2</sub>	W	0	20,1	29,4	46,6	62	75,2	81	86,4	88,9
η	%	0	8,3	11,5	16,8	21,1	23,6	24,5	25,3	25,5



Rys 4.3

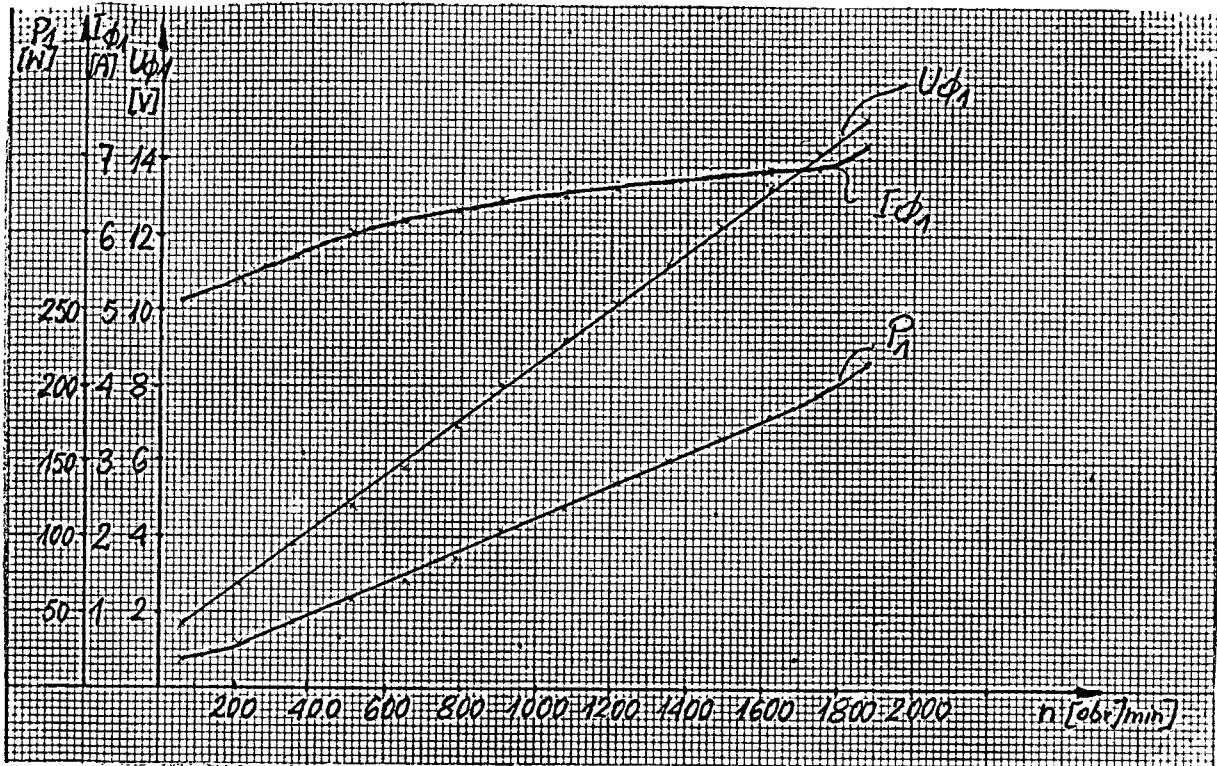
#### 4.4 Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego

Charakterystykę biegu jałowego wyznaczono zasilaając silnik napięciem zmiennym skokowo od  $U_{\phi 1} = U_{\phi 2} = 15V$  do wartości powodującej zastrzygnięcie się silnika. Obroty silnika mierzone multitachemetrem. Równocześnie mierzono prąd  $I_{\phi 1}$ .

Wyniki pomiarów zestawiono w tabelicy 4.4 a przebiegi charakterystyk na rys 4.4.

Tablica 4.4

$U_{\phi_1}$	V	15	14,1	13,2	12,2	11,2	10,2	9,2	8	6,9	5,8	4,8	3,8	2,75	1,7
$n$	obr./min	1876	1752	1620	1487	1351	1215	1078	927	788	648	513	360	217	66
$I_{\phi_1}$	A	7,2	6,85	6,85	6,8	6,7	6,6	6,5	6,45	6,3	6,15	6,0	5,7	5,4	5,1
$P_1$	W	216	193,2	180,8	165,9	150,9	134,6	119,6	103,2	86,9	71,3	57,6	43,3	29,7	19,4



Rys 4.4

4.5. Wyznaczenie stałych napięcia i momentu.

Stałą napięcia  $K_E$  wyznaczono napędzając silnik innym silnikiem i mierząc napięcie indukowane w fazie  $\phi_1$

$$K_E = \frac{U_{\phi_1}}{n} = \frac{3V}{522 \text{ obr./min}} = 5,747 \cdot 10^{-3} \frac{V}{\text{obr./min}}$$

Stałą momentu  $K_M$  wyznaczono mierząc moment rozruchowy i prądy w obydwu fazach w 4 kolejnych położeniach wirnika w których moment reluktancyjny jest równy zero. Wyniki zestawiono w tabelicy 4.5.1

Tabela 4.5.1

$I\phi_1$	A	0	9,5	12,5	8,5
$I\phi_2$	A	15,5	9,5	0	9,5
$M_r$	Nm	0,0399	0,741	0,1995	0,399
$K_H$	$\frac{Nm}{A} \cdot 10^3$	2,574	39,0	15,96	22,17

Z uwagi na znaczne różnice  $K_H$ ,  $M_r$  i  $I\phi$  przeprowadzono powtórnie pomiary, zasilając silnik bezpośrednio z dwóch zasilaczy. Wyniki zestawiono w tabeli 4.5.2 i rys 4.5

#### 4.6. Wyznaczenie momentu reluktancyjnego (trzymającego).

Moment reluktancyjny przyjmuje wartość maksymalną wtedy, kiedy żłobek twornika znajduje się na średnicy magnesu wirnika. W położeniu kiedy średnica magnesu wirnika pokrywa się z linią środkową zęba twornika moment reluktancyjny przyjmuje wartości zero, działa natomiast moment hamujący naciągu żołysek o stałej wartości.

$$M_{rel_{max}} + M_{toi} = 1,52 \text{ Nm}$$

$$M_{toi} = 0,4275 \text{ Nm}$$

$$M_{rel_{max}} = 1,1 \text{ Nm}$$

#### 4.7. Wyznaczenie momentu oporowego żołysek.

Moment oporowy żołysek wyznaczono w położeniu wirnika, gdzie moment reluktancyjny przyjmuje wartości zero, jak w p. 4.6

$$M_{toi} = 0,4275 \text{ Nm}$$

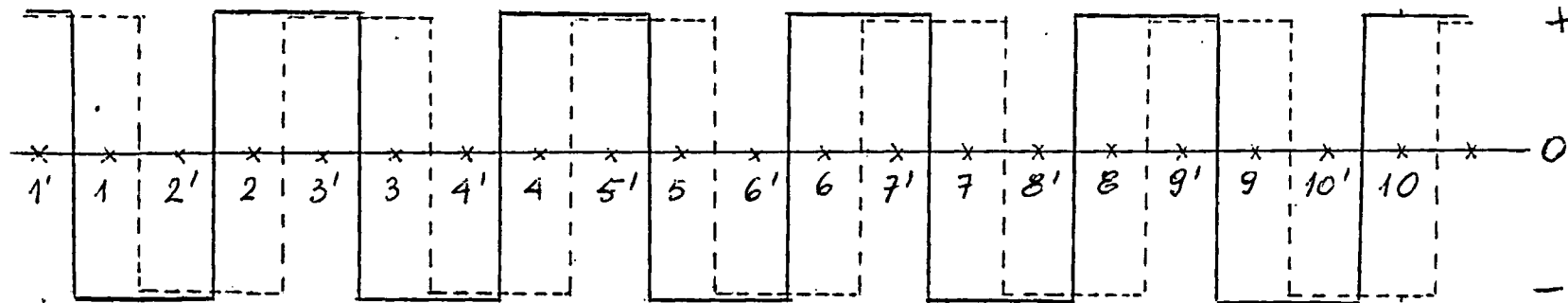
Tablica 4.52

		Polozenie wirnika																			
		1'	1	2'	2	3'	3	4'	4	5'	5	6'	6	7'	7	8'	8	9'	9	10'	10
Wart. siły na sredn. $D = 190 \text{ mm.}$ [kG]	Zat. fazy																				
	$\phi_1$	0,5	0,5	0,5	0,48	0,5	0,48	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,48	0,5
	$\phi_2$	0,55	0,6	0,55	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,55	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	$\phi_1 + \phi_2$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Kier. przepływu prądu w fazie	$\phi_1-1$	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+
	$\phi_1-2$	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
	$\phi_2-1$	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
	$\phi_2-2$	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-

1)  $U_{zas I} = U_{zas II} = 2,1 \text{ V}$

2) początek fazy I w p-ku  $\phi_1-1$

3) początek fazy II w p-ku  $\phi_2-2$



Кіерунок преріцни пряду н фазач  $\Phi_1$  —  
 і  $\Phi_2$  ----

Рус. 4.5

#### 4.8. Bilans strat

Bilans strat przeprowadono dla biegu jałowego silnika przyjmując, że jest on obciążony stałym momentem hamującym (wirednionym momentem reluktancyjnym i oporowym żożysk  $M_{sr}$ ). Wtedy

$$\text{moc pobierana } P_1 = 2I\Phi_1 \cdot U\Phi_1 = 234 \text{ W}$$

moc tracona na wykonanie momentu  $M_{sr}$

$$\Delta P_{sr} = M_{sr} \cdot n_0 = 1,03 = 0,11 \cdot 1922 \cdot 1,03 = 217,76 \text{ W}$$

moc tracona w uzwojeniu żrownika

$$\Delta P_{cu} = 2R I \Phi_1^2 = 2^2 \cdot 0,009 \cdot 7,8^2 = 2,19 \text{ W}$$

pozostała moc tracona jest przemagnesowanie żelaza

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - \Delta P_{sr} - \Delta P_{cu} = 234 - 217,8 - 2,19 \text{ W}$$

### 5. WNIOSKI I ZALECENIA

#### 5.1 Wnioski

##### 5.1.1. Konstrukcja

Przyjęta konstrukcja umożliwia sprawdzenie magnesowania silnika w stanie zżożonym (szerokość robocza  $\delta = 0$ ), natomiast jednak uzyskanie zżożonej szerokości  $\delta = 0,1 \text{ mm}$  i powoduje występowanie znacznego momentu hamującego od nacisku żożysk  $M_{zi} = 0,4275 \text{ Nm}$ .

W przypadku przyjęcia konstrukcji umożliwiającej utrzymanie stałej zżożonej szerokości, oraz wykonanie silnika w budowie zamkniętej, pojawia się trudny technicznie problem magnesowania magnesu żrownika. Na obecnym etapie brak jest koncepcji zapewniającej technologiczne rozwiązanie tego problemu.



### 5.1.2. Obwód magnetyczny

Po namagnesowaniu magnesów wirnika pojawił się moment reluktancyjny o wartości szczytowej  $M_{rel} = 1,1 Nm$ . trudny do przewidzenia, ponieważ nie występuje on w silnikach tarczowych prądu stałego, jak również w silnikach z komutacją elektroniczną znanych z literatury. Moment reluktancyjny można wyeliminować zwiększając szczelinę i wkładając uzwojenie na podłożu tarczy magnetycznej. Sprowadza to konieczność ponownego przeliczenia obwodu magnetycznego i skomplikuje wykonanie uzwojenia.

### 5.1.3. Parametry silnika

Pomijając wystąpienie momentu reluktancyjnego, oraz przyjmując 10-15% wartości momentu oporowego od naciągu łożysk silnik osiąga założone parametry tj. 300W przy 3000 obr/min.

$I_{\phi 1} = 10,8 A$   $U_{\phi 1} = 16 V$ . W p. 3 omówiono zasadę działania z której wynika, że moment obrotowy powinien być stały w każdym położeniu wirnika, w dowolnej chwili czasowej.

Z pomiarów wynika, że wymagany moment zależy od położenia wirnika (p. 4.5). Dotychczas nie udało się wyjaśnić przyczyn występowania różnic w momencie obrotowym.

### 5.1.4. Czujniki hallotronowe.

Zastosowane czujniki hallotronowe zdają się pełni egzamin w układzie wykrywania położenia wirnika i sterowania układem komutacyjnym. Z uwagi jednak na fakt, że mogą one pracować tylko do temp. otoczenia  $70^{\circ}C$ , należy zastąpić je czujnikami transformatorowo-impulsowymi. W związku z powyższym zachodzi konieczność opracowania i wykonania takich czujników.

## 5.2. Zalecenia

### 5.2.1. Konstrukcja

Zaprojektować model wirnikowy w budowie zamkniętej wykorzystując doświadczenia nabyte przy wykonaniu modelu laboratoryjnego.

Rozwiązać problem magnesowania.

### 5.2.2. Obwód magnetyczny

Przeprowadzić obliczenia obrotu magnetycznego uwzględniając różniące rozłożenie uzwojenie na pojedynczych tarczach magnetycznych.

### 5.2.3. Czujniki położenia wirnika

W miejsce czujników hallotronowych, należy opracować i wykonać czujniki transformatorowo-indukcyjne.

### WNIOSKI KOŃCOWE.

1. Silnik ze względu na swój gabaryt nie może być całkowitym zamiennikiem dla silnika zastosowanego w napędzie do IRb-6
2. Silnik może być zastosowany w IRb-6 do napędu robota w osiach  $M_z, T$ , po dokonaniu odpowiednich zmian konstrukcyjnych w robocie.
3. Gabaryt silnika (długość średnica, mała długość lub wysokość) umożliwia stosowanie go w napędach gdzie wiadomości te są konieczne.
4. Ze względu na duży moment bezładności wirnika i konieczność forsowania prądem w momencie rozruchu, silnik <sup>z magnesami z ALNICO650</sup> może pracować w napędach nie wymagających <sup>częstych</sup> ~~180°~~ rewersów.
5. Moment bezładności wirnika można zmniejszyć ok. 10-krotnie stosując magnesy z materiałem SAMARIUM-COBALT.
6. Dalsze prace należy prowadzić dla silnika 170W, tzn takiego, który umożliwiłby sprawdzenie go w robocie IRb-6.