

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW
MERA-PIAP

Al. Jerozolimskie 202

02-222 Warszawa

Telefon 23-70-81

OSRODEK AUTOMATYKI ELEKTRYCZNEJ

074

Zespół Budowy Robotów i Serwomechanizmów

A

Główny wykonawca mgr inż. G. Heszen *G Heszen*

Wykonawcy mgr inż. Z. Wawerek, mgr inż. M. Wójcik

Konsultant prof. dr inż. T. Missala, prof. dr inż. J. Owczarek

Nr zlecenia
UR-01.03.02.B

Układy regulacyjne silników prądu
stałego z komutacją elektroniczną.
Etap 2b: Badania laboratoryjne
drugiej wersji sterownika w
połączeniu z modelem silnika 170W.

Zlecaniodawca MERA-PIAP

Pracę rozpoczęto dnia 20.11.84

Kierownik Ośrodka

Missala
prof. dr inż. T. Missala

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

Gałązka
dr inż. T. Gałązka

zakończono dnia 15.12.84

Kierownik Zespołu

Jabłoński
dr inż. P. Jabłoński

Praca zawiera:

stron 17

rysunków 8

fotografii

tabel

tablic

załączników 1

Rozdzielnik - ilość egz:

Egz. 1 BOINTE

Egz. 2 OAE-3

Egz. 3 OAE-5

Egz. 4 OAE

Egz. 5

Egz. 6

Nr rejestr. 5360

Analiza deskryptorowa

ROBOTY PRZEMYSŁOWE: UKŁADY NAPĘDOWE Z SILNIKAMI
ELEKTRYCZNYMI. KOMUTATOR ELEKTRONICZNY.

Analiza dokumentacyjna

Praca zawiera opis i wyniki badań modelu laboratoryjnego sterownika silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną współpracującego z modelem silnika o mocy 170W. Przedstawiono też wnioski z badań i koncepcję rozwiązania sterownika.

Tytuły poprzednich sprawozdań

UKłady regulacyjne silników prądu stałego z komutacją elektroniczną. Etap 2. Badania laboratoryjne sterownika w połączeniu z modelem silnika 0,3 kW /sprawdzenie koncepcji/, Opracowanie założeń.

Nr rej. 5175. Zakończono 30.12.83r.

621.313.13 Silniki

621.316.543 Sterowniki

UKD

MERA-PIAP/TW 331/78 5000

2

Spis treści

| | |
|--|----|
| 1. Wstęp | 4 |
| 2. Zmiany w konstrukcji sterownika i silnika w stosunku do pierwszej wersji modelu | 4 |
| 3. Badania SEM silnika i napięć wyjściowych z czujników hallotronowych | 4 |
| 4. Badania wpływu położenia czujników na sprawność silnika i sprawność całkowitą układu | 6 |
| 5. Badania wpływu współczynnika wypełnienia napięcia na sprawność silnika i sprawność całkowitą układu | 9 |
| 6. Badania silnika przy zasilaniu napięciem modulewanym | 11 |
| 7. Badania rozruchu i wybiegu silnika | 14 |
| 8. Badania zakresu regulacji prędkości obrotowej silnika | 14 |
| 9. Badania górnej częstotliwości przenieszenia układu napędowego | 15 |
| 10. Badania możliwości regulacji prędkości silnika poprzez zmianę współczynnika wypełnienia napięcia | 15 |
| 11. Wnioski dotyczące sterownika | 16 |
| 12. Wnioski dotyczące zastosowania silnika do napędu robota | 16 |
| 13. Wnioski dotyczące innych zastosowań silnika | 17 |

Załącznik 1

Koncepcja rozwiązania modelu użytkowego sterownika
silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną.

1. Wstęp

Praca zawiera opis i wyniki badań laboratoryjnych drugiej /ulepszonej/ wersji sterownika silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną w połączeniu z drugim modelem silnika. Podane wnioski dotyczące zastosowań silnika do napędu robotów oraz innych możliwościach zastosowań silnika. W Załączniku 1 opisano jest koncepcja rozwiązania sterownika.

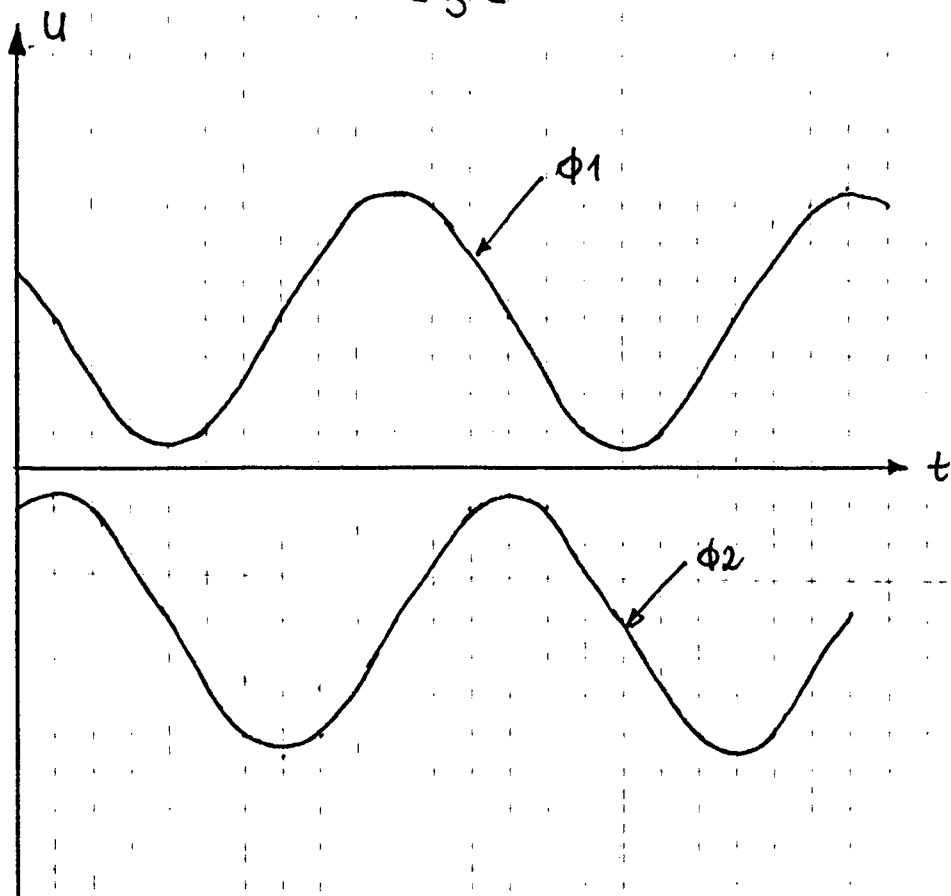
2. Zmiany w konstrukcji sterownika i silnika w stosunku do pierwszej wersji modeli

Na podstawie badań pierwszej wersji modeli sterownika i silnika w drugiej wersji modeli wprowadzone następujące istotne zmiany:

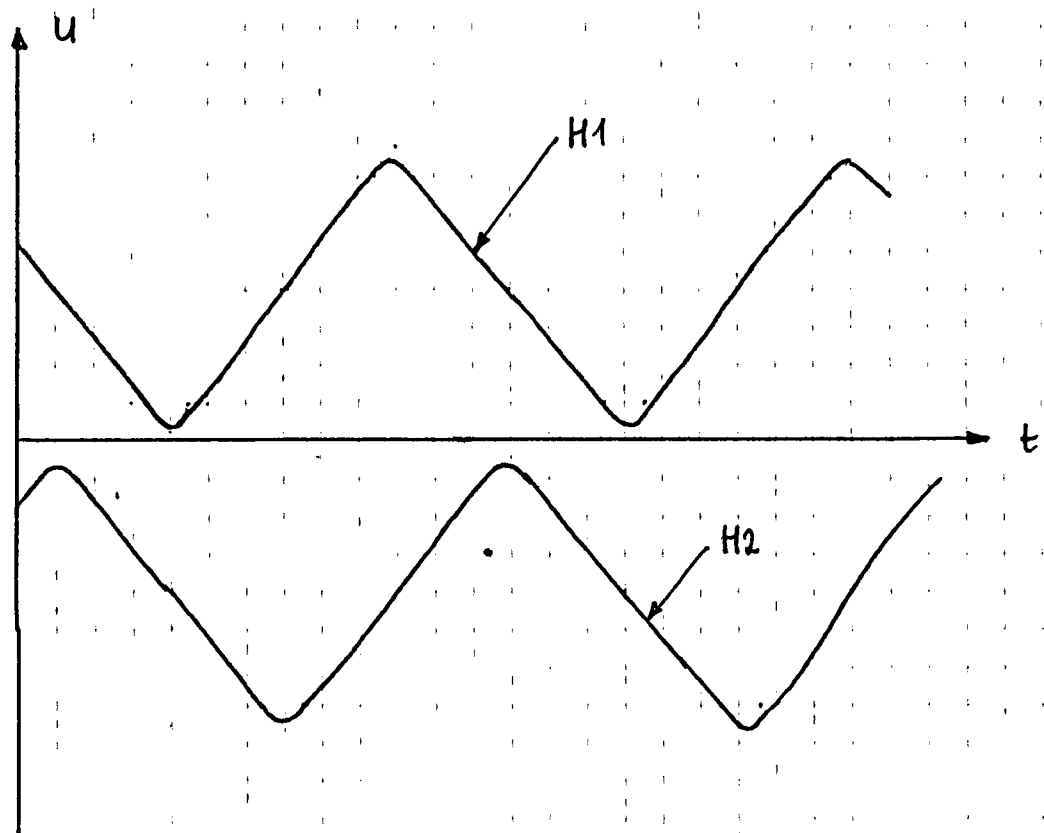
- w silniku zastosowano płaskie uzwojenia, co pozwoliło wyeliminować szkodliwy moment reluktancyjny,
- czujnik położenia wału zbudowany w postaci oddzielnej tarczy z magnesami, współpracującej z hallotronami umieszczonymi na pierścieniu przesuwającym obrotowe. Takie rozwiązanie czujnika zapewniło kształt przebiegu napięcia wyjściowego hallotronów zbliżony do trójkątnego oraz umożliwiło przesuwanie punktu komutacji,
- w sterowniku zastosowano modulację napięcia wyjściowego z ustaloną częstotliwością ok. 3 kHz, przez co uzyskano zmniejszenie strat przełączania /patrz zał.1/. Zmieniono także rodzaj regulatora prądu z dwustanowego na regulator PID, co zapewniło szerszy zakres regulacji prądu.

3. Badania SEM silnika i napięć wyjściowego z czujników hallotronowych

Badany silnik był napędzany przez sprzężony z nim mechanicznie silnik prądu stałego. Kształt SEM indukowanej w uzwojeniach silnika przedstawia rys.1. Uzyskane przebiegi są zbliżone do sinusoidalnych z nieznacznym spłaszczeniem wierzchołków sinusoid.



Rys. 1 Kształt SEM w uzwojeniach silnika



Rys 2. Kształt napięcia wyjściowego czujników hallotronowych

Częstotliwość przebiegów wynika z liczby par magnesów i prędkości obrotowej, wynosi ona:

$$f = p \cdot n,$$

gdzie: p - liczba par magnesów, $p = 5$

n - prędkość obrotowa silnika $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Wartość SEM, z uwagi na słabe namagnesowanie wirnika wynosiła ok. 9V przy prędkości 3000 obr/s.

Przebiegi SEM obu uzwojeń silnika są przesunięte względem siebie o 90° .

Kształt napięcia wyjściowego czujników hallotronowych, badane go na wyjściach wzmacniaczy różnicowych współpracujących z tymi czujnikami, przedstawia rys.2.

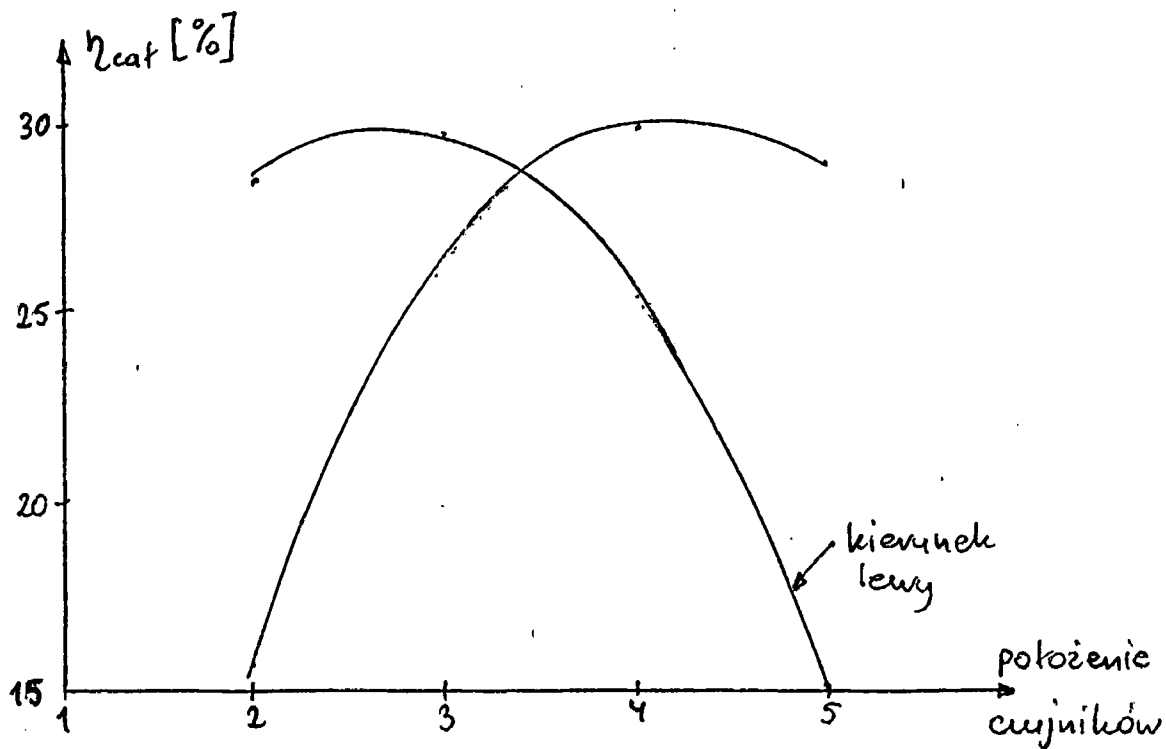
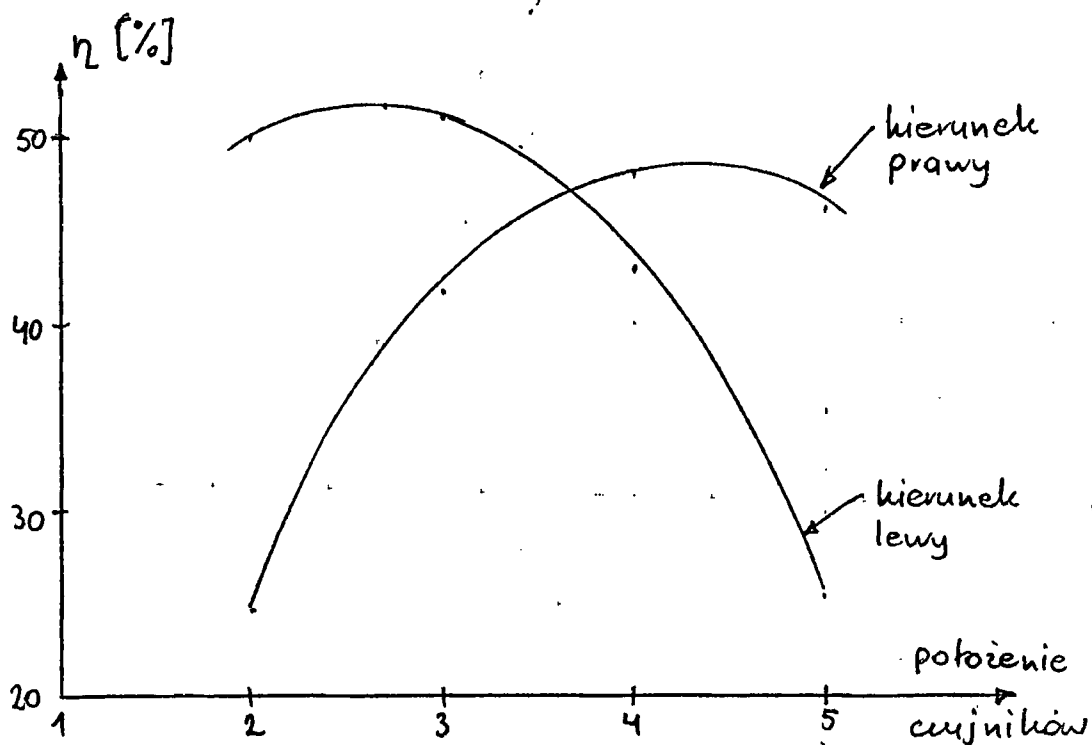
Amplituda napięcia na wyjściach wzmacniaczy wynosiła ok. 8V, przesunięcie fazowe 90° , częstotliwość była zgodna z częstotliwością SEM.

W sterowniku przebiegi te są wykorzystywane do generowania napięć sterujących silnikiem. Przed połączeniem wyjść sterownika z silnikiem dokonano wstępnej regulacji położenia czujników tak, aby fazy przebiegów napięcia z czujników były zgodne z fazami indukowanych SEM.

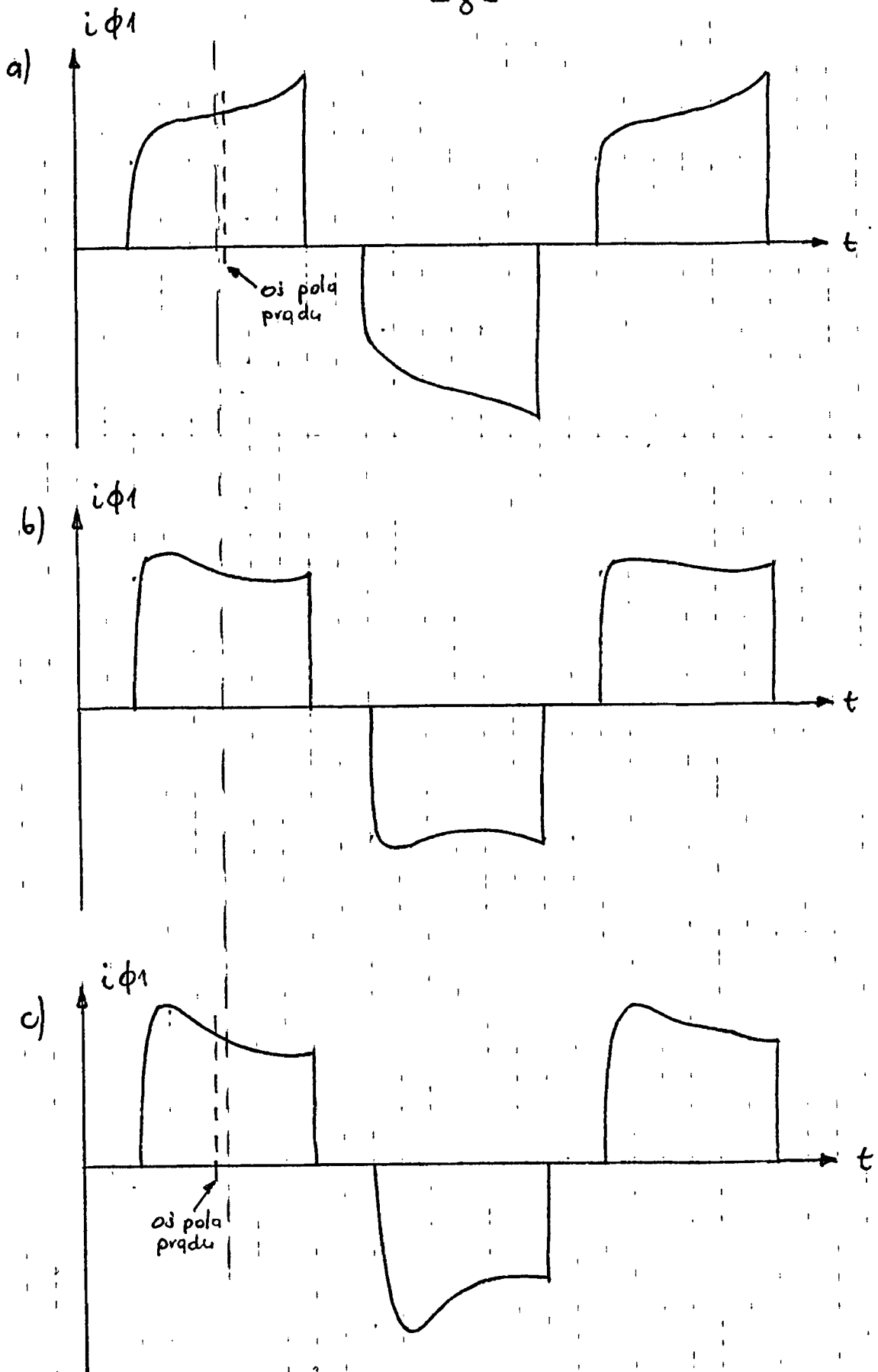
4. Badania wpływu położenia czujników na sprawność silnika i sprawność całkowitą układu.

Położenie czujników hallotronowych ma istotny wpływ na parametry silnika /moment obrotowy, prądu pobierany i sprawność/. Na rys.3 przedstawione wykresy sprawności silnika i sprawności całkowitej układu /uwzględniającej straty w sterowniku/ w funkcji położenia czujników hallotronowych dla pięciu wybranych położenia czujników i dwóch kierunków wirowania. Przebiegi wyznaczone przy współczynniku wypełnienia napięcia, wynoszącym ok. 75%, stałym momencie obciążenia 0,024 kGm i stałym napięciu na silniku, wynoszącym 8V.

Jak widać z otrzymanych wykresów, położenie czujników zapewniające maksimum sprawności jest różne dla dwóch kierunków wirowania silnika. Można to wyjaśnić na podstawie rys.4, przedstawiającego przebiegi prądu w silniku dla różnych



Rys. 3. Wpływ położenia czujników na sprawność silnika (a) i sprawność katodową (b) dla dwóch kierunków wirowania



Rys. 4 Przebiegi prądu w silniku pny różnych kątach komutacji: a) komutacja opóźniona b) komutacja optymalna c) komutacja z nadmiernym wyprzedzeniem

kątów komutacji /położenie czujników/.

Linia przerywaną oznaczono tę chwilę, w której moment obrotowy ma wartość maksymalną. Chwila ta odpowiada maksymalnej wartości indukowanej siły elektromotorycznej.

Ze względu na indukcyjny charakter obciążenia /uzwojeń silnika/ przebiegi prądu są opóźnione w stosunku do napięcia.

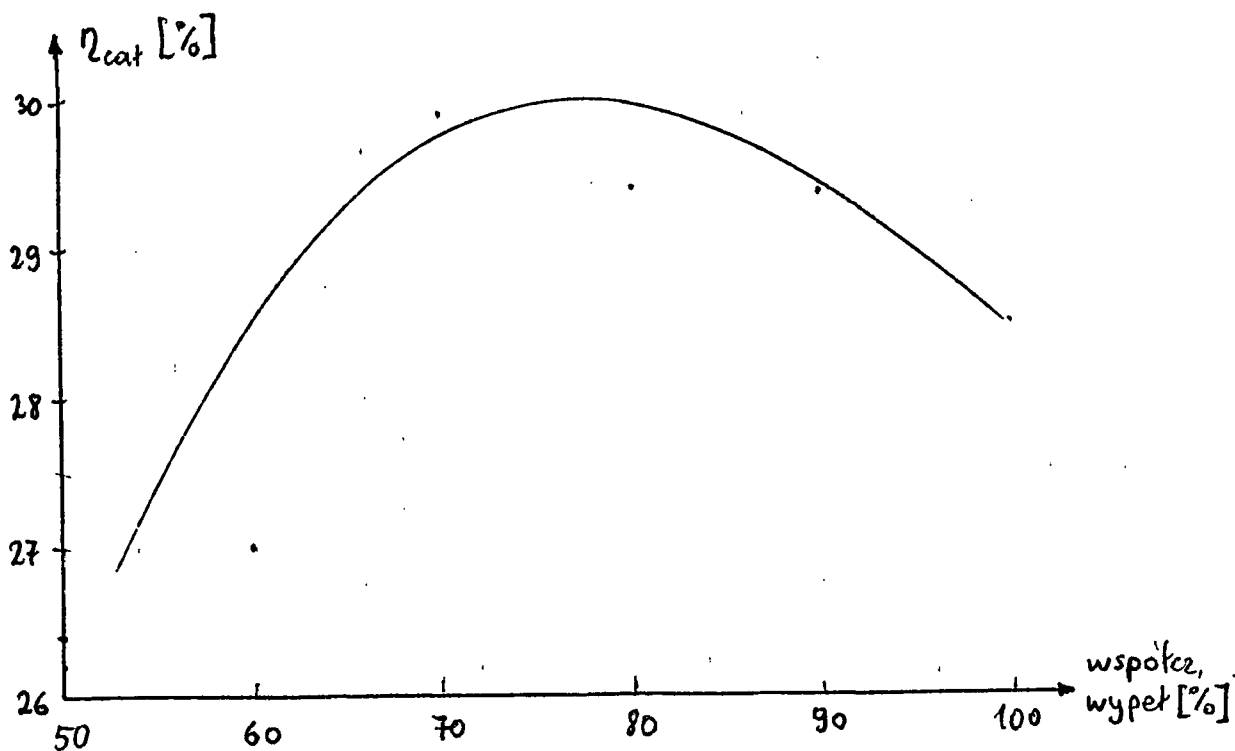
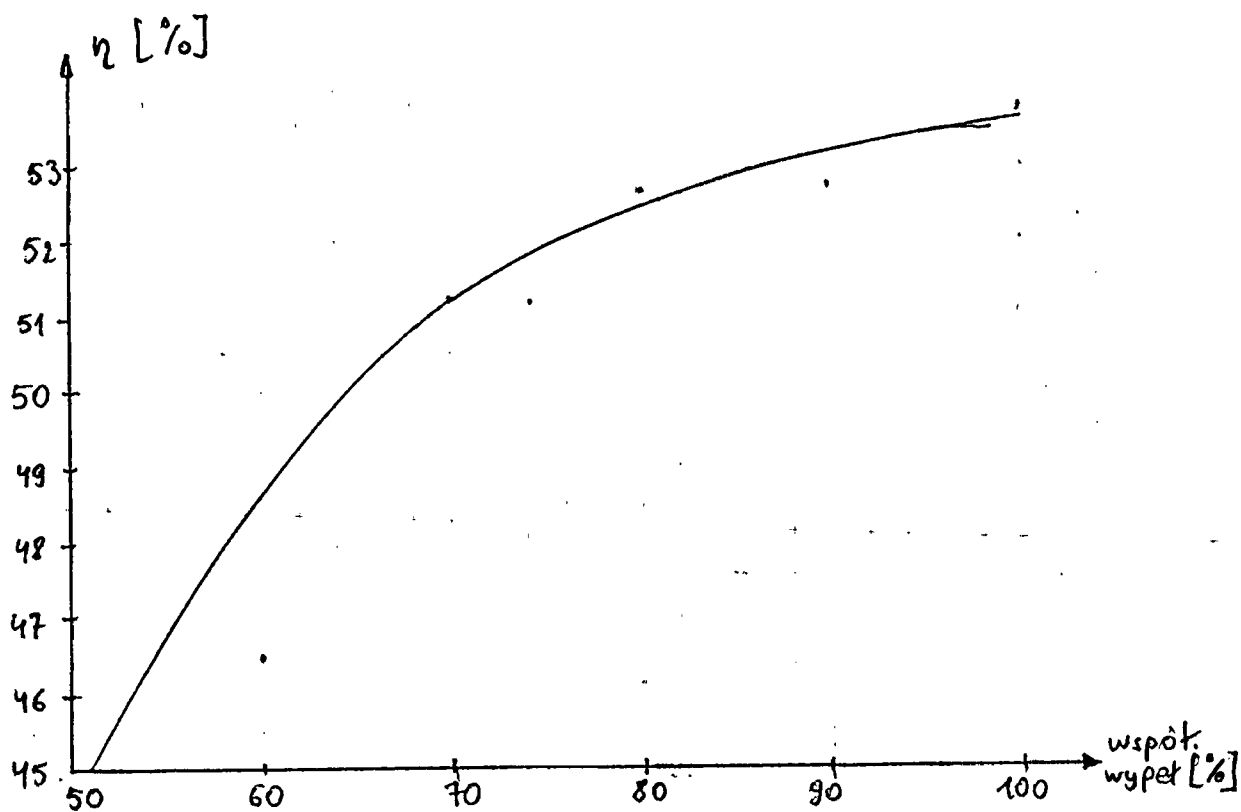
W związku z tym, przy prostokątnym przebiegu napięcia, symetrycznym w stosunku do linii przerywanej, oś pola prądu jest opóźniona w stosunku do tej linii /rys.4a/. Zjawisko to zmniejsza moment obrotowy silnika i obniża sprawność układu.

W celu skompensowania tego opóźnienia, należy przesunąć wyprzedzenie komutacji, tak aby oś pola prądu pokrywała się z linią przerywaną /rys.4b/. Rys.4c pokazuje przebiegi przy nadmiernym wyprzedzeniu komutacji.

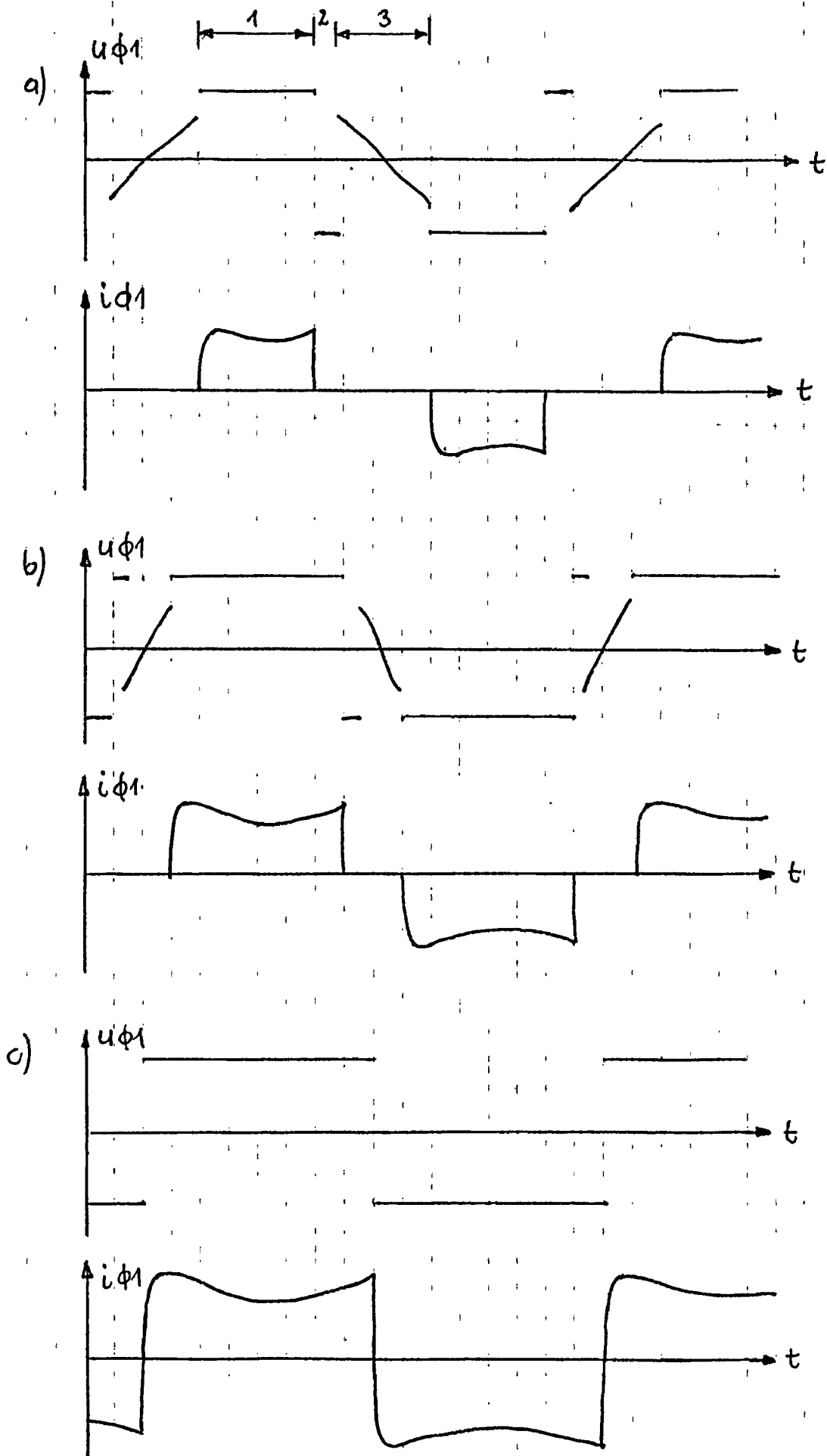
5. Badania wpływu współczynnika wypełnienia napięcia na sprawność silnika i sprawność całkowitą układu

Dzięki trójkątnym przebiegom napięcia z czujników hallotronowych możliwa była regulacja współczynnika wypełnienia napięć zasilających silnik w granicach od ok. 20 do 100%. Ponieważ przy współczynnikach wypełnienia napięcia poniżej 50% silnik nie ma momentu rezruchowego w pewnych położeniach wirnika, więc badania ograniczone do współczynników wypełnienia w zakresie od 50 do 100%.

Badania sprawności silnika i sprawności całkowitej w funkcji współczynnika wypełnienia napięcia przeprowadzone przy ustalonym optymalnie położeniu czujników i jednym kierunku wirowania silnika. Napięcie na silniku wynosiło 8V, moment obciążenia 0,024 kGm. Uzyskane wykresy sprawności przedstawia rys.5. Sprawność całkowita układu wykazuje maksimum dla współczynnika wypełnienia 75-80%. Spadek sprawności całkowitej przy wyższych wartościach współczynnika wypełnienia wynika ze strat w tranzystorach mocy sterownika przy dużych chwilowych wartościach prądu, występujących w pobliżu punktów komutacji.



Rys. 5. Sprawność silnika η i sprawność cathodowa η_{cat} w funkcji współczynnika wypełnienia napięcia



Rys. 6. Przebiegi napięcia i prądu przy współczynniku wypełnienia napięcia: a) 50% b) 75% c) 100%

11

Na rys.6 przedstawiono uzyskane przebiegi napięcia i prądu przy różnych wartościach współczynnika wypełnienia. Na rys.6a zaznaczone trzy charakterystyczne przedziały czasu. W przedziale /1/ silnik jest zasilany napięciem dodatnim i płynie prąd w obwodzie silnika. W przedziale /2/ na skutek odłączenia napięcia, w uzwojeniu jest generowana siła elektromotoryczna o kierunku przeciwnym niż kierunek tego napięcia. Wartość generowanej siły elektromotorycznej jest ograniczona przez diody rozłączeniowe sterownika do poziomu ujemnego napięcia zasilania sterownika. W przedziale /3/ widoczny jest fragment przebiegu SEM silnika.

6. Badania silnika przy zasilaniu napięciem modulowanym.

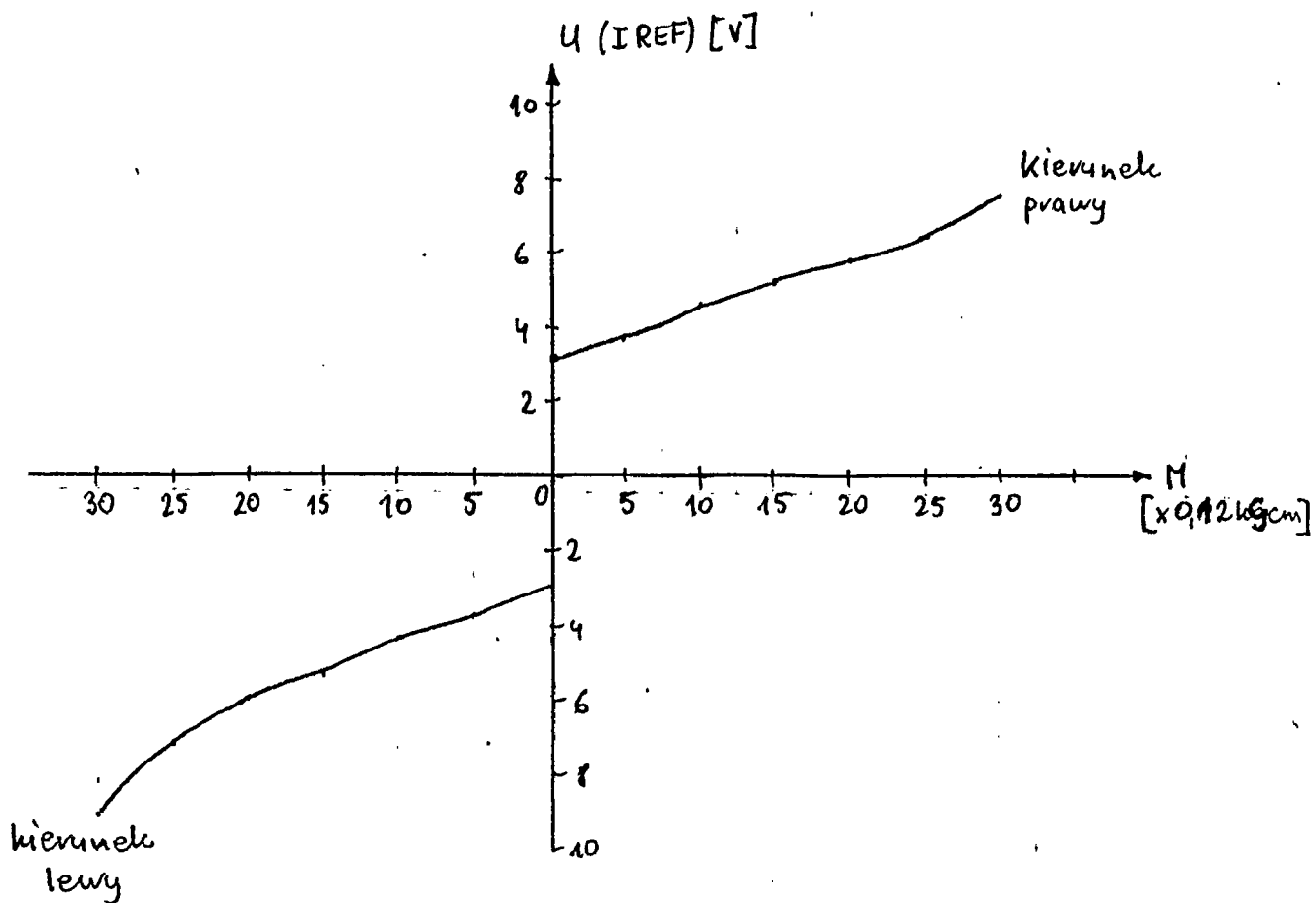
W rzeczywistym układzie regulacji silnik zasilany jest napięciem o regulowanej wartości, a regulacja jest dokonywana przez modulację szerokości impulsów napięcia w każdym półokresie przebiegu napięcia.

Dla sprawdzenia przyjętej koncepcji regulacji napięcia przeprowadzone badania wartości napięcia na wejściu regulatora prądu sterownika, niezbędne do utrzymania prędkości obrotowej silnika 3000 obr/min przy momencie obciążenia zmieniającym się od 0 do 0,036 kGm. Badania przeprowadzone przy współczynniku wypełnienia napięcia równym 80%, dla obu kierunków wirowania silnika.

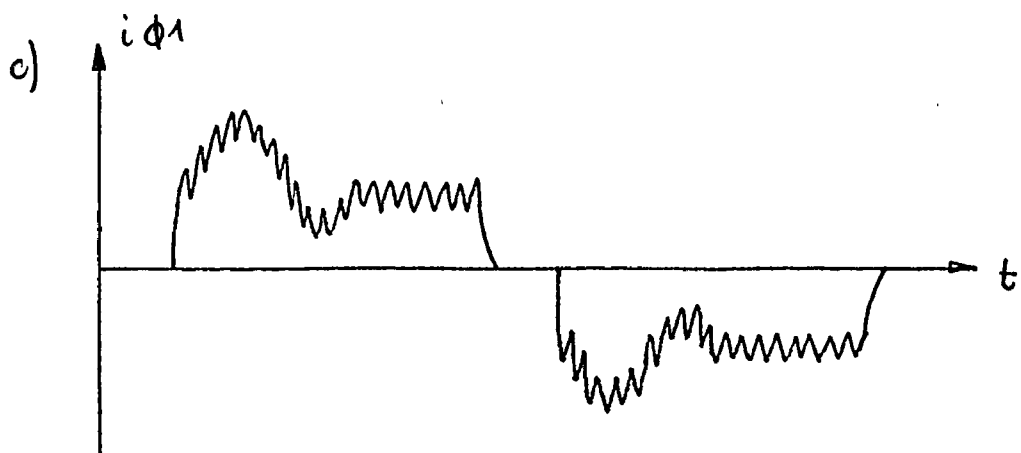
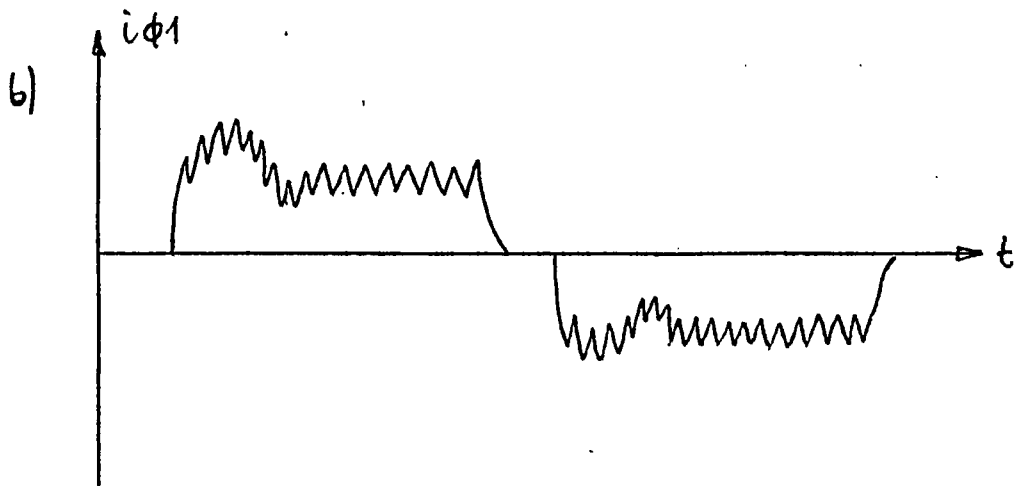
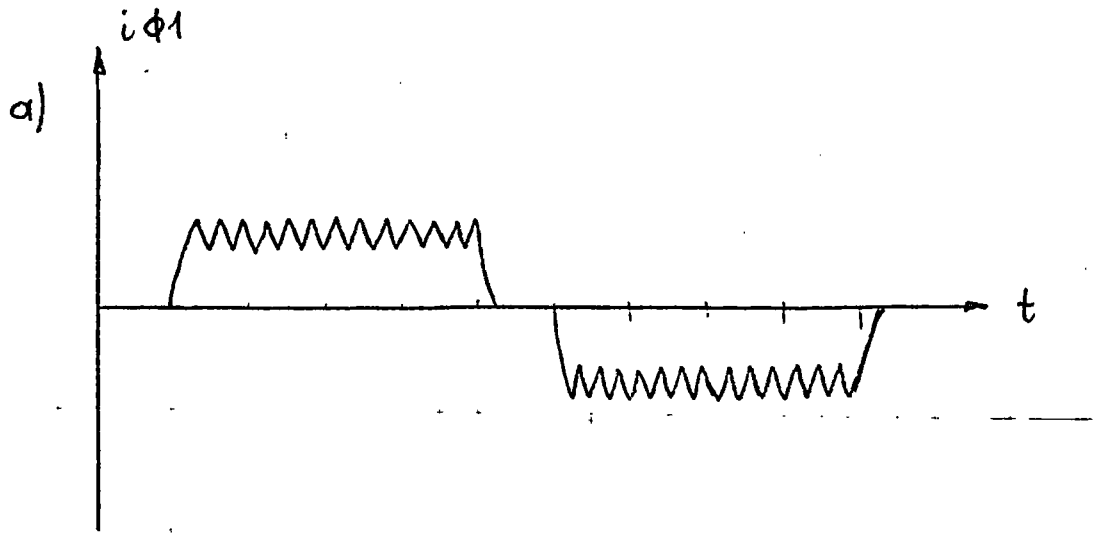
Otrzymany wykres przedstawia rys.7. Skok napięcia zadanego przy zmianie kierunku wirowania silnika wynika z faktu, że dla utrzymania prędkości obrotowej 3000 obr/min, nawet przy braku obciążenia, niezbędne jest pewne niezerowe napięcie zadane.

Napięcie to wynosiło odpowiednio +3V i -3V dla obu kierunków wirowania.

Rys.8 przedstawia kształt przebiegów prądu w silniku przy różnych parametrach dynamicznych regulatora prądu. W obwodzie prądowego sprzężenia zwrotnego zastosowano filtr dolnoprzepustowy, dzięki czemu uzyskano regulację typu PID, przy czym stała czasowa różniczkowania odpowiadała stałej czasowej tego filtra.



Rys. 7. Napięcie na wejściu regulatora prądu, niezbędne do utrzymania prędkości silnika 3000 obr/min przy zmieniającym się momencie obciążenia



Rys 8. Przebiegi prądu przy impulsowej regulacji napięcia. (a) stała czasowa filtra 0ms, (b) - 1ms, (c) - 2,2ms.

AH

Rys.8a przedstawia przebieg prądu przy stałej czasowej filtru /różniczkowania/ równej zeru. Piękoształtny obrys przebiegu, wynika z modulacji napięcia z częstotliwością ok. 3 kHz. Rys.8b i c przedstawiają przebiegi prądu przy stałej czasowej filtru odpowiednio 1 ms i 2,2 ms. Widoczne jest forsowanie prądu w początkowej fazie każdego półokresu. Umożliwia to kompensację opóźnienia wywołanego indukcyjnością uzwojeń /patrz rys.4/.

W czasie prób stwierdzono silniejsze nagrzewanie się tranzystorów mocy sterownika oraz silnika, niż w przypadku zasilania napięciem niemodulowanym. Wiąże się to ze stratami przełączania w tranzystorach mocy oraz stratami na prądy wirowe w silniku.

Ponadto konieczne było zastosowanie dławików w obwodzie silnika w celu ograniczenia prądu szczytowego. Zastosowanie dławików spowodowało także zmniejszenie tętnień prądu wynikających z modulacji napięcia.

7. Badania rozruchu i wybiegu silnika.

W celu sprawdzenia właściwości dynamicznych silnika przeprowadzono próbę rozruchu silnika nieobciążonego. Próbę przeprowadzono przez skokowe załączenie napięcia zasilającego sterownik. Stała czasowa rozruchu wyniosła 0,4s, szczytowy prąd w czasie rozruchu 30A. Następnie przeprowadzono próbę wybiegu, uzyskując stałą czasową ok. 1,5s.

8. Badania zakresu regulacji prędkości obrotowej silnika.

Do próby silnik włączono w układ z zamkniętą pętlą regulacji prędkości. Wstępne próby wykazały brak stabilności układu przy parametrach regulatora prędkości takich jak w sterownikach robota IRb-6. Po zwiększeniu stałej czasowej całkowania ok. 100-krotnie, uzyskano stabilność układu i odpowiedź na wymuszenie skokowe zawierającą jedno przeregulowanie.

Następnie przeprowadzone próby sztywności napędu przy prędkościach obrotowych 100, 1000 i 2500 obr/min.

Moment obciążenia zmieniany był w granicach od 0 do 0,06 kGm. Próby nie wykazały jakichkolwiek zmian prędkości przy zmianach obciążenia, co jest zrozumiałe przy statycznej charakterystyce regulatora. Prędkość obrotowa 100 obr/min była minimalną prędkością, przy której bieg silnika był jeszcze równomierny. Przy niższych prędkościach silnik pracował skokowo bądź też zatrzymywał się. Jest to związane prawdopodobnie ze zbyt małą liczbą par biegunów wirnika.

9. Badania górnej częstotliwości przenieszenia układu napędowego

W układzie z zamkniętą pętlą regulacji prędkości zadawano prędkość z generatora przebiegów wolnozmiennych. Przebieg prędkości zadanej był przebiegiem sinusoidalnym.

Pasmo przenieszenia przy amplitudzie prędkości rzeczywistej ok. 200 obr/min. wynosiło ok. 5 Hz. Jako częstotliwość graniczną przyjęto taką częstotliwość, przy której sygnał prędkości rzeczywistej był opóźniony w stosunku do sygnału prędkości zadanej o 90° .

10. Badania możliwości regulacji prędkości silnika poprzez zmianę współczynnika wypełnienia napięcia.

Przyjęta metoda regulacji prędkości obrotowej silnika poprzez modulację napięcia z częstotliwością ok. 3 kHz wymaga stosowania dławików w obwodzie silnika, a ponadto powoduje znaczne straty mocy na przełączanie /w sterowniku/ i prądy wirowe /w silniku/.

Dlatego też sprawdzono możliwość regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę współczynnika wypełnienia napięcia w zakresie od 20 do 100%. Próby przeprowadzone na silniku nieobciążonym. Uzyskany zakres regulacji wynosił od ok. 1000 do 3600 obr/min. Przy niewielkich prędkościach obrotowych bieg silnika stawał się nierównomierny.

11. Wnioski dotyczące sterownika.

11.1. Przyjęta koncepcja rozwiązania sterownika została sprawdzona z wynikiem pozytywnym.

11.2. Należy zmienić konstrukcję wzmacniacza mocy sterownika tak, aby zminimalizować straty przełączania powstające przy modulacji napięcia.

12. Wnioski dotyczące zastosowania silnika do napędu robota.

12.1. Silnik tej konstrukcji nie nadaje się do napędu robota z uwagi na zbyt duży moment bezwładności wirnika.

Powoduje to następujące konsekwencje:

- znaczne straty energetyczne, związane z rozpędzaniem i hamowaniem silnika. Ocenia się, że przy typowym cyklu pracy robota, średni pobór mocy przez układy napędowe byłby około dwukrotnie wyższy niż w przypadku detychczasowych silników,
- konieczność wielokrotnego forsowania prądu przy rozruchu i hamowaniu silnika. Wymagałoby to zastosowania w sterowniku dużych grup tranzystorów pracujących równolegle oraz przekonstruowania transformatorów i prostownika układu sterowania w celu przystosowania ich do znacznych przeciążeń. Tak przekonstruowane zespoły nie zmieściłyby się w obecnej szafie sterowniczej.

12.2. Występują trudności z utrzymaniem równomiernego biegu silnika przy niewielkich prędkościach obrotowych. Wymagany zakres regulacji prędkości wynosi od 30 do 3000 obr/min, podczas gdy w badanym silniku uzyskano zakres od ok. 100 obr/min do 3000 obr/min. Nie wyklucz się, że przy bardziej precyzyjnym doborze parametrów dynamicznych regulatora prędkości można byłoby uzyskać lepsze wyniki w zakresie małych prędkości. Z drugiej strony, ograniczona liczba biegunów wirnika powoduje, że uzyskanie dużo lepszych wyników nie wydaje się możliwe.

13. Wnioski dotyczące innych zastosowań silnika.

Cechy silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną /duży moment bezwładności, duży moment rozruchowy, wysoka trwałość/ wskazują możliwe pola zastosowań tego silnika.

Są to napędy charakteryzujące się:

- stałą lub niezbyt często zmienianą prędkością obrotową,
- niewielkim zakresem zmian prędkości,
- stosunkowo niewielką mocą ze względu na ograniczoną wydajność prądową tranzystorów mocy
- wymaganą wysoką trwałością.

Tego typu napędy występują w pamięciach dyskowych i taśmowych, magnetowidach, gramofonach, magnetofonach i podobnym sprzęcie zarówno profesjonalnym jak też powszechnego użytku.

Koncepcja rozwiązania modelu użytkowego sterownika silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną.

1. Podstawowe bloki sterownika i ich funkcje /rys.1/

Sterownik zawiera następujące podstawowe bloki:

Regulator prędkości. Regulator prędkości wytwarza sygnał błędu prędkości na podstawie sygnału prędkości zadanej ze sterownika prędkości oraz sygnału prędkości rzeczywistej z prądnicy tachometrycznej. Sygnał błędu prędkości stanowi sygnał zadany dla regulatora prądu.

Ze względu na fakt, że regulowany prąd ma charakter prądu przemiennego, niezbędne jest wytworzenie dwóch sygnałów wartości zadanych prądu: +IREF i -IREF, odpowiednio dla dodatniego i ujemnego półokresu prądu. Pomiędzy sygnałami +IREF i -IREF zachodzi zależność: $+IREF = -1/7 IREF/$.

Detektor położenia 1,2. Detektor położenia 1/2/ określa położenie magnesów wirnika względem uzwojeń twornika w silniku, na podstawie sygnałów z czujników hallotronowych H1 /H2/. Detektor wytwarza sygnały sterujące zestawami kluczy półprzewodnikowych 1 /2/.

Zestaw kluczy 1,2. Zestaw kluczy 1/2/ dołącza do wejścia regulatora prądu 1/2/ sygnał prądu zadanego +IREF lub -IREF, w zależności od sygnałów sterujących kluczami, generowanych przez detektor położenia 1/2/. W rezultacie tego sygnał prądu zadanego IREF-1 /IREF-2/ na wejściu regulatora prądu 1/2/ ma charakter przemienny.

Regulator prądu 1,2. Regulator prądu 1/2/ typu PI wytwarza sygnał błędu prądu $\Delta I F1 / \Delta I F2/$ z różnicy sygnału prądu zadanego IREF1 /IREF2/ i sygnału prądu rzeczywistego IF1 /IF2/.

Zadaniem regulatora jest utrzymywanie takiej wartości sygnału $\Delta I F1 / \Delta I F2/$, aby w każdym półokresie napięcia sterującego silnikiem UF1 /UF2/, wartość rzeczywista prądu silnika odpowiadała wartości zadanej tego prądu.

Modulator 1,2. Modulator 1/2/ wytwarza sygnał prostokątny F1/F2/ o wypełnieniu modulowanym w zależności od sygnału $\Delta I F1 / \Delta I F2/$. Modulacja dokonywana jest przez porównanie sygnału $\Delta I F1 / \Delta I F2/$ z przebiegiem piłkocząstym UP, wytwarzanym w układzie generatora napięcia piłkocząstego.

Wzmacniacz mocy 1/2/. Wzmacniacz wytwarza dwukierunkowe napięcie UF1 /UF2/, zasilające uzwojenie fazy 1/2/ silnika. Napięcie UF1 jest napięciem przemiennym, którego wartość średnia półokresowa zmienia się w zależności od obciążenia silnika, a okres jest zależny od prędkości wirowania silnika.

2. Schemat funkcjonalny sterownika i przebiegi poszczególnych sygnałów.

Schemat funkcjonalny sterownika oraz ważniejsze sygnały w układzie sterownika przedstawia rys.2.

2.1. Obwód regulatora prędkości

Do regulatora prędkości typu PID doprowadzony jest sygnał prędkości zadanej VREF ze sterownika położenia i sygnał prędkości rzeczywistej VGEN z tachogeneratora, a także logiczny sygnał sterujący BLOCK z układu sterowania robota. Sygnał BLOCK zeruje regulator, tzn. gdy BLOCK = 0V, sygnał wyjściowy regulatora ma wartość zero, niezależnie od sygnałów VREF i VGEN. Zerowanie regulatora ma miejsce w stanie przejściowym po włączeniu zasilania układu. W czasie normalnej pracy układu, sygnał BLOCK ma wartość -15V i regulator jest odblokowany.

Sygnał błędu prędkości VERR z wyjścia regulatora prędkości jest doprowadzony do wejścia detektora przekroczenia prądu. Detektor ten generuje sygnał logiczny ILIM, o ile wartość bezwzględna sygnału VERR przekroczy określony poziom w ciągu czasu przekraczającego 3s. Sygnał ILIM jest wykorzystywany w układzie sterowania robota do ograniczenia sygnału prądu zadanego w sterownikach mocy wszystkich osi robota.

Sygnał VERR jest również doprowadzony do wejścia ogranicznika. Sygnał wyjściowy ogranicznika +IREF jest równy sygnałowi VERR o ile wartość bezwzględna sygnału VERR nie przekrocza poziomu ograniczenia. Jeżeli natomiast wartość bezwzględna sygnału VERR jest równa lub wyższa od poziomu ograniczenia, to sygnał +IREF ma wartość odpowiadającą poziomowi ograniczenia ze znakiem dodatnim lub ujemnym, w zależności od znaku sygnału VERR.

Ogranicznik ma dwa poziomy ograniczenia, wybierane sygnałem logicznym LOW z układu sterowania robota. Poziom ograniczenia jest wysoki, o ile sygnał LOW ma poziom niski. Wysokiemu poziomowi sygnału LOW odpowiada niski poziom ograniczenia.

2.2. Obwód regulatora prądu

Sygnał wyjściowy ogranicznika $+IREF$ jest sygnałem prądu zadanego dla regulatora prądu. Ponieważ prąd płynący w uzwojeniach silnika jest prądem przemiennym, więc regulacja prądu odbywa się oddzielnie dla dodatniego i ujemnego półokresu przebiegu prądu. W tym celu inwerter analogowy wytwarza sygnał $-IREF$ poprzez odwrócenie sygnału $+IREF$. Do wejścia regulatora prądu 1 doprowadzony jest sygnał przemienny $IREF1$, generowany z sygnałów $+IREF$ i $-IREF$ dołączanych na przemian za pośrednictwem kluczy półprzewodnikowych $+K1$ i $-K1$. Do drugiego wejścia regulatora prądu jest doprowadzony sygnał prądu rzeczywistego $IF1$, pobierany z opornika włączonego szeregowo w obwód uzwojenia fazy 1 silnika. W każdym półokresie przebiegu prądu regulator dąży do utrzymania wartości prądu rzeczywistego $IF1$ równej wartości prądu zadanego $IREF1$.

Przebiegi w układzie regulatora prądu przedstawia rys.3. Sygnał $IREF1$ ma na przemian wartość równą $+IREF$ i $-IREF$, na skutek łączenia na przemian kluczy $+K1$ i $-K1$. Sygnał prądu zadanego ma więc charakter przemienny. Przerwa występująca pomiędzy załączeniem kluczy $+K1$ i $-K1$, w czasie której sygnał prądu zadanego jest równy zero, zapewnia brak przepływu prądu w uzwojeniu silnika w pobliżu punktów komutacji, dzięki czemu uzyskuje się wyższą sprawność układu napędowego. W czasie tej przerwy regulator prądu jest zerowany za pomocą klucza $K1$ /rys.2/. Zerowanie przygotowuje regulator do pracy w następnym półokresie regulacji prądu.

Kierunek momentu obrotowego silnika zależy od znaku sygnału $+IREF$. Na podstawie rys.3 łatwo zauważyć, że zmiana znaku sygnału $+IREF$ spowoduje zmianę znaku sygnału $IREF1$. To samo zjawisko będzie miało miejsce w obwodzie regulatora 2. W rezultacie tego nastąpi zmiana znaku sygnałów prądu zadanego dla obu uzwojeń silnika i zmiana kierunku momentu obrotowego.

Na schemacie funkcjonalnym /rys.2/ pokazano dwa sygnały wyjściowe regulatora prądu 1: $\Delta IF1 + P$ i $\Delta IF1 - P$. Sygnały te odpowiadają sygnałowi $\Delta IF1$ powiększonemu i pomniejszonemu odpowiednio o napięcie polaryzacji P .

Tego typu sygnały są niezbędne ze względu na sterowanie wzmacniacza mocy z wyeliminowaniem prądów skrośnych.

2.3. Obwód modulatora i wzmacniacza mocy

Napięcie sterujące wzmacniaczem mocy ma charakter impulsów o regulowanym wypełnieniu. W celu uzyskania takiego napięcia, sygnały wyjściowe regulatora prądu $\Delta IF1+P$ i $\Delta IF1-P$ są porównywane z sygnałem piłkkształtnym UP, generowanym przez generator napięcia piłkkształtnego.

Przebieg porównywania przedstawiono na rys.4. W wyniku porównania powstają dwa sygnały $+FI$ i $-FI$ sterujące odpowiednio dodatnią i ujemną stroną wzmacniacza mocy.

Pomiędzy okresami, gdy sygnały $+FI$ i $-FI$ są aktywne /niskie/ występuje przerwa czasowa, uzyskana dzięki różnicy poziomów sygnałów $\Delta IF1+P$ i $\Delta IF1-P$. W czasie tej przerwy żadna ze stron wzmacniacza mocy nie jestysterowana. Przerwa ta umożliwia odzyskanie własności zaporowych przez tranzystory wzmacniacza mocy, a tym samym eliminuje przepływ prądów skrośnych w układzie wzmacniacza.

Przebieg napięcia wyjściowego $UF1$ wzmacniacza mocy, jaki występuje przy zasilaniu wirującego silnika, oraz przebieg prądu wyjściowego $IF1$ przy obciążeniu wzmacniacza uzwojeniem wirującego silnika przedstawia rys.5.

Prąd płynący w uzwojeniu silnika ma charakter prądu przemiennego, zmieniającego znak w funkcji kąta obrotu silnika. W każdym półokresie prądu, napięcie na uzwojeniu wielokrotnie zmienia wartość od $-U$ do $+U$ na skutek działania modulatora. Chwilę w których napięcie $UF1$ przyjmuje wartość $+U$, oznaczono przez $T / + /$, a chwile w których napięcie to przyjmuje wartość $-U$ - przez $T / - /$. Dla uproszczenia pominięto chwile, w których napięcie $UF1$ przyjmuje wartość 0, pokazane na rys.4.

Przy sygnale prądu zadanego $IREF=0$ modulacja miałaby charakter symetryczny, tzn. $T / + / = T / - /$, średnia wartość napięcia $UF1$ w każdym półokresie byłaby wówczas równa zeru, a tym samym prąd wyjściowy /średniony/ byłby równy zeru.

W sytuacji, gdy $IREF \neq 0$ pokazanej na rysunku, $T / + / \neq T / - /$, przez co średnia wartość prądu w każdym półokresie jest różna od zera. Ze względu na fakt, że sygnałem zadanym dla regulatora prądu w kolejnych półokresach jest na przemian sygnał $+IREF$ i $-IREF$, ~~w~~ znak prądu $IF1$ w kolejnych półokresach zmienia się.

Kolejne półokresy prądu oddzielone są przerwami, w czasie których napięcie nie jest modulowane. Przerwy te wynikają z przebiegu sygnału IREF1 /rys.3/.

Częstotliwość modulacji napięcia wynosi 5 kHz, a maksymalna częstotliwość prądu w uzwojeniach silnika /odpowiadająca maksymalnej prędkości wirowania silnika/ wynosi 500Hz.

Oznacza to, że w każdym półokresie prądu IF1 wystąpi co najmniej 10 przełączeń napięcia UF1, co wystarcza do precyzyjnej regulacji wartości średniej prądu.

Bramki B1-B4, pokazane na rys.2, zapewniają blokadę sterowania wzmacniaczy mocy w dwóch przypadkach:

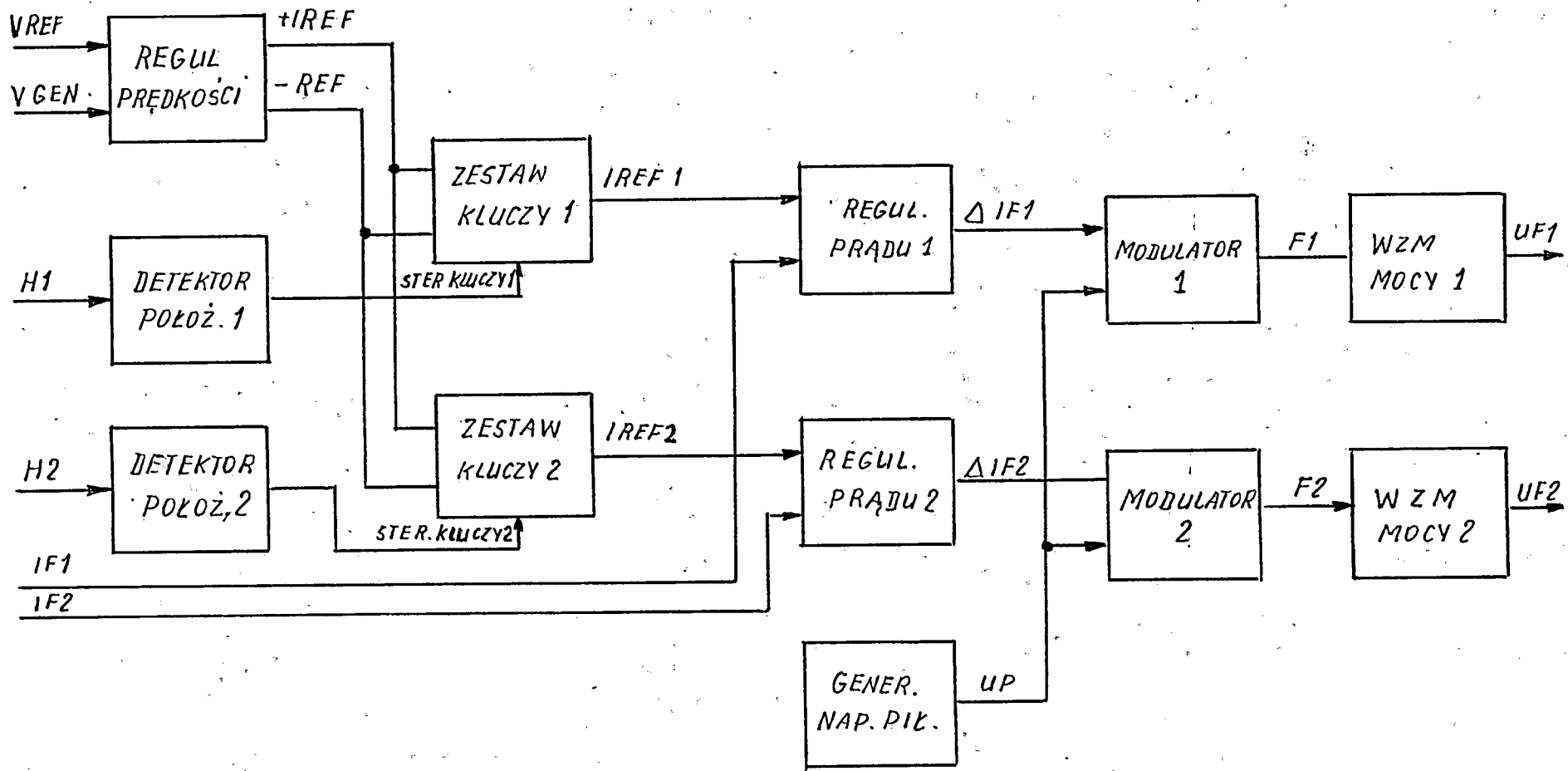
- gdy sygnał BLOCK z układu sterowania robota jest aktywny. Blokowanie sterowania ma na celu wyeliminowanie przypadkowych występowania wzmacniaczy w momencie włączania zasilania układu,
- gdy wał silnika przyjmuje położenia bliskie punktom komutacji /zmiany fazy prądu/. Wówczas sygnał blokujący $\overline{BL1}$ i $\overline{BL2}$ eliminuje proces przełączania napięcia UF1 /UF2/, a regulator prądu 1 /2/ jest zerowany. Wyeliminowanie przełączania napięcia w tym czasie pozwala zmniejszyć starty przełączania we wzmacniaczach mocy.

2.4. Obwód detektora położenia

Zadaniem obwodu detektora położenia jest wytworzenie sygnałów sterujących kluczami elektronicznymi oraz sygnałów blokady $\overline{BL1}$ i $\overline{BL2}$ blokujących sterowanie wzmacniaczy mocy w pobliżu punktów komutacji. Sygnałami wejściowymi komutatora elektronicznego są napięcia generowane przez dwa czujniki hallotronowe. Czujnik H1 generuje na swoich wyprowadzeniach H1-3 i H1-4 napięcie różnicowe, wzmacniane przez wzmacniacz różnicowy 1.

Na wyjściu wzmacniacza występuje sygnał H1 o przebiegu zbliżonym do trójkątnego /rys.6/. Sygnał H1 jest porównywany w detektorze poziomu 1 z dwoma napięciami stałymi +H1DET i -H1DET, generowanymi w układzie nastawy poziomu detekcji. W wyniku porównania powstają sygnały +H1 i -H1, pokazane na rys.6. Następnie w układzie sterowania kluczy 1 następuje wygenerowanie sygnałów logicznych +K1, -K1, K1 sterujących kluczami oraz sygnału blokady $\overline{BL1}$.

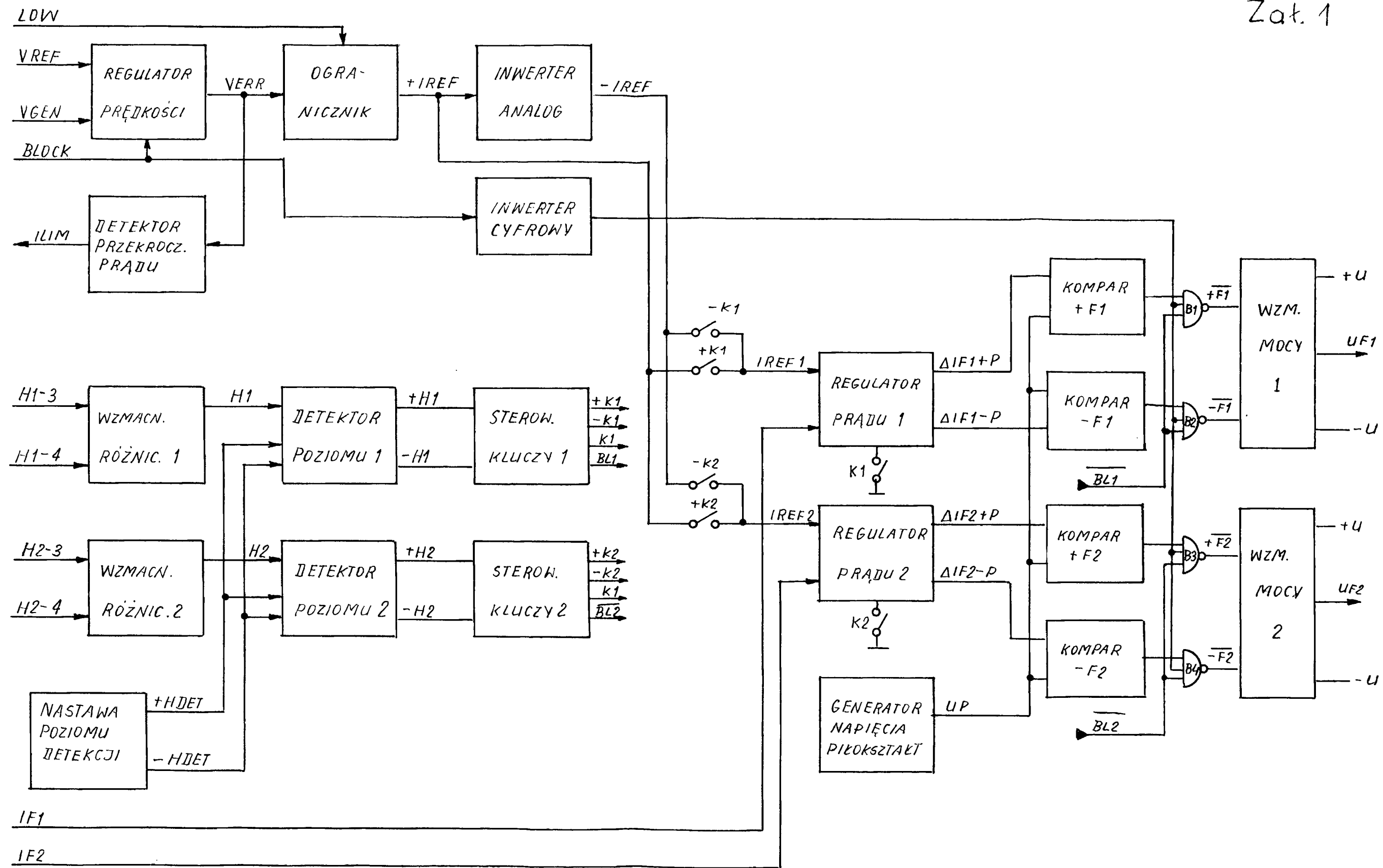
Funkcje tych sygnałów zostały omówione w p. 2.2 i 2.3.



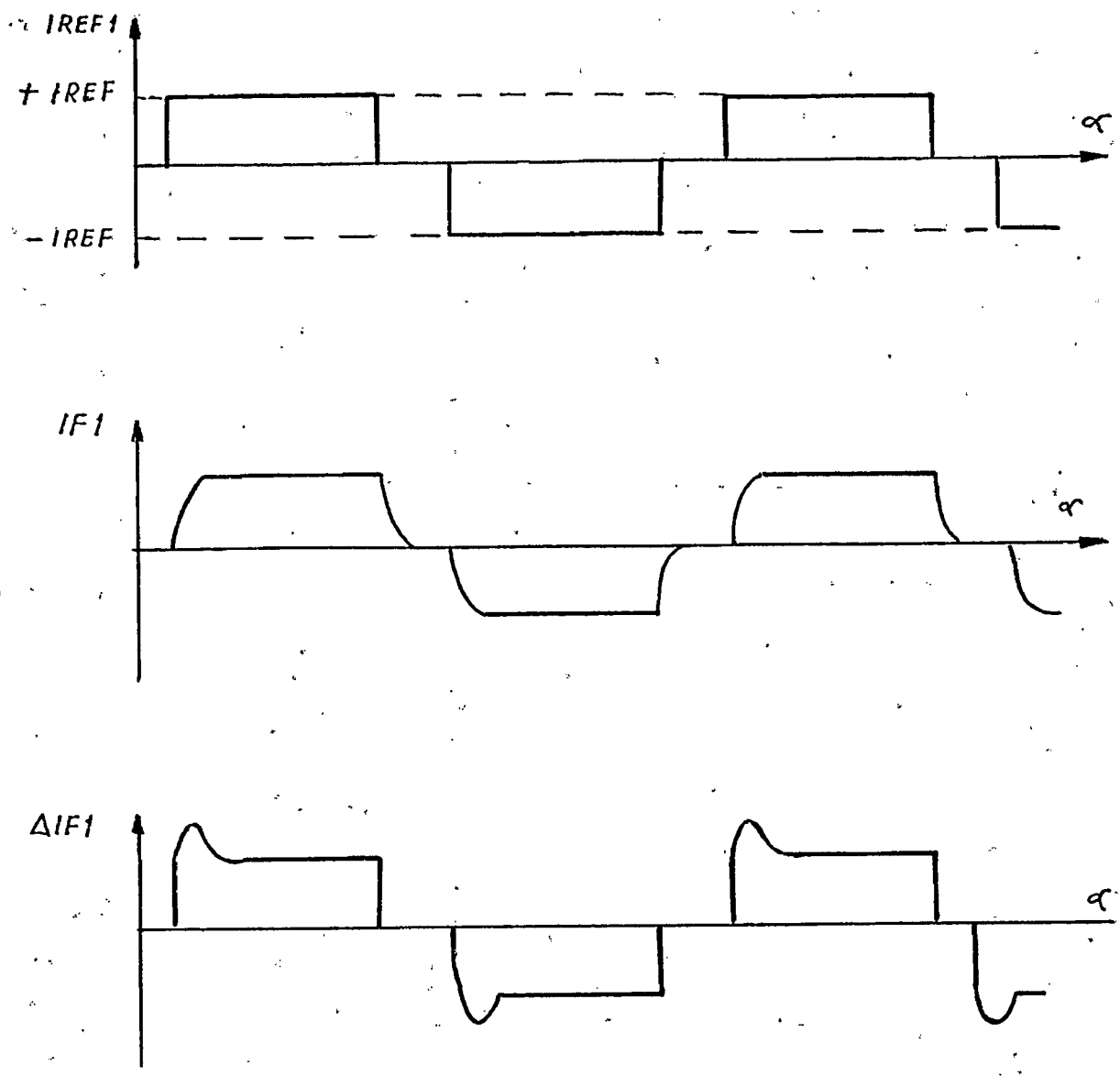
Rys. 1 Schemat blokowy sterownika silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną

MG

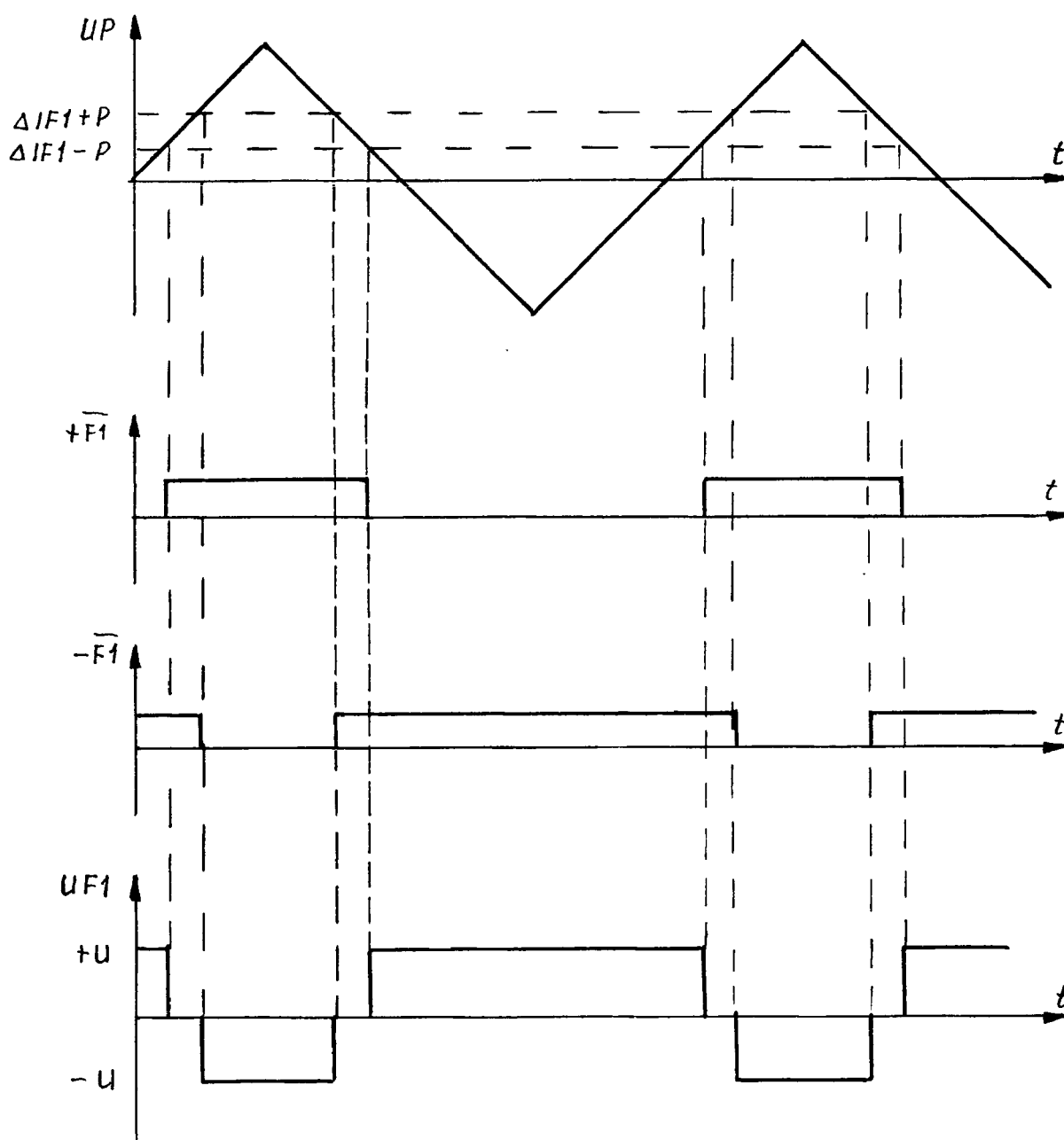
Zak. 1



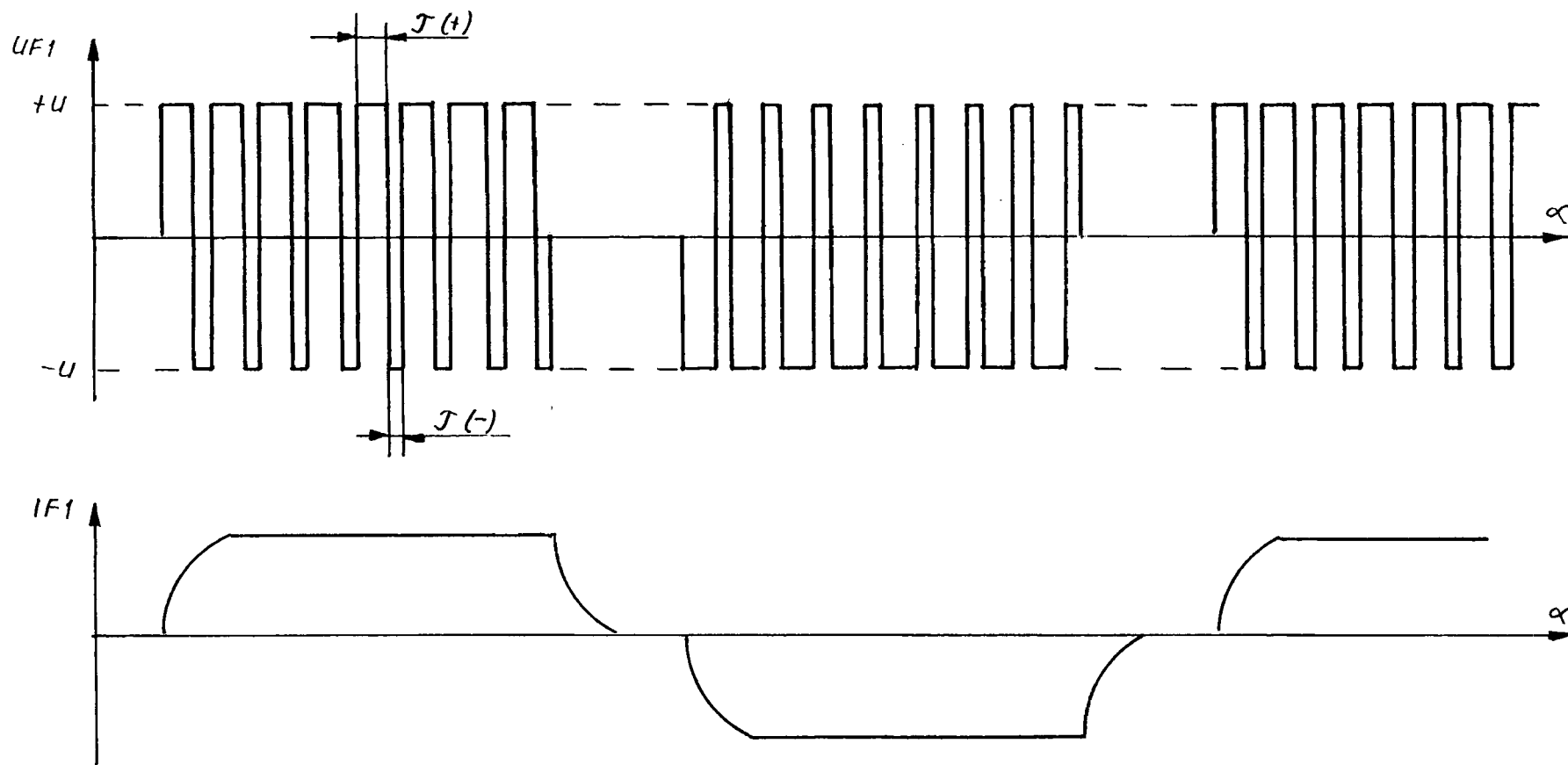
Rys. 2 Schemat funkcjonalny sterownika silnika prądu stałego z komutacją elektroniczną



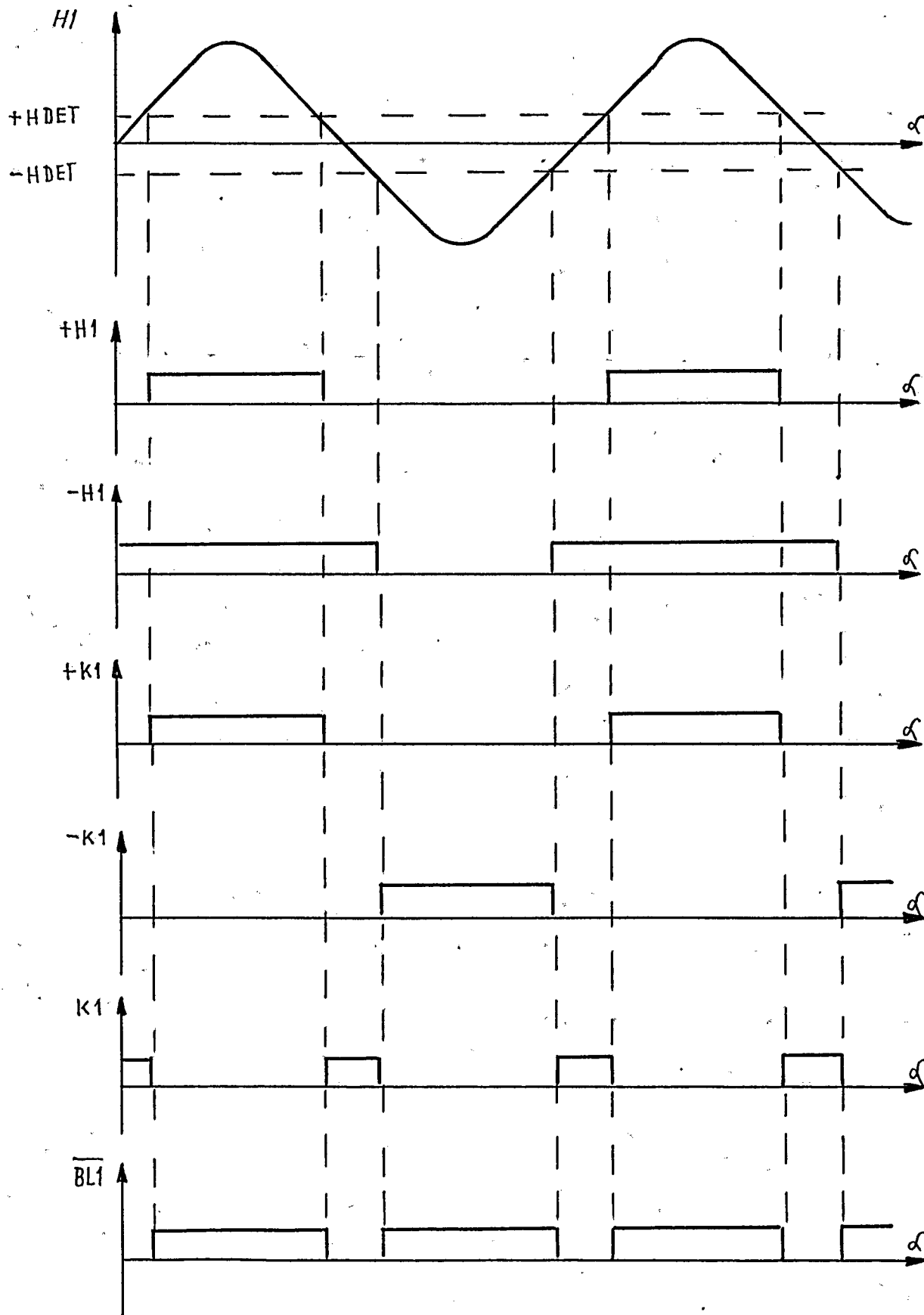
Rys.3 Przebiegi w układzie regulatora prądu w funkcji kąta obrotu wału silnika α



Rys. 4 Zasada modulacji napięcia wyjściowego sterownika



Rys. 5 Przebiegi napięcia wyjściowego U_{F1} wzmacniacza mocy oraz przebieg prądu wyjściowego I_{F1} (uśredniony) w funkcji kąta obrotu wału silnika



Rys. 6 Przebiegi w układzie detektora położenia w funkcji kąta obrotu wału silnika α .