

Grzegorz PAWEŁCZYK
Elektrownia Jaworzno III S.A.

SPRZĘGŁO INDUKCYJNE SAMOWZBUDNE

Streszczenie. Przedstawiono uproszczony opis konstrukcji i zasadę działania sprzęgła indukcyjnego samowzbudnego przeznaczonego do płynnej regulacji prędkości obrotowej pomp i wentylatorów.

Przy pewnych założeniach upraszczających przedstawiono rozptył mocy, straty oraz sprawność sprzęgła.

Opisano sposób przeprowadzenia badań eksperymentalnych prototypowego modelu sprzęgła. Przedstawiono rezultaty tych badań oraz wynikające z nich wnioski.

INDUCTIVE SELF-EXCITED CLUTCH

Summary. This paper presents a simplified description of construction and principle of operation of an inductive self-excited clutch. This device is used for continuous control of pump and fan rotational speed. Power flow, power loss and efficiency of the clutch have been estimated under simplifying assumptions. The way of experimental tests made on a clutch prototype has been presented. Tests results and conclusions drawn from them have been given as well.

1. WPROWADZENIE

W procesach technologicznych wielu zakładów przemysłowych bardzo często występuje konieczność płynnej regulacji wydajności różnych urządzeń, jak np. pompy, wentylatory. Obecnie najbardziej rozpowszechnionym sposobem prowadzącym do tego celu jest regulacja dławieniowa polegająca na zmianie wielkości otwarcia zaworu umieszczonego na króćcu tłocznym w pobliżu pompy [1]. Jest to sposób bardzo prosty, ale zarazem najmniej ekonomiczny. Innym, znacznie bardziej ekonomicznym sposobem, jest stosowanie sprzęgła

hydrokinetycznego. Wadą tych sprzęgieł jest jednak stosunkowo wysoka cena, jak też dość znaczna awaryjność.

Najbardziej ekonomicznym obecnie sposobem regulacji wydajności pomp i wentylatorów jest zastosowanie tyrystorowych przemienników częstotliwości do zasilania silników klatkowych lub tyrystorowych układów kaskadowych współpracujących z silnikami pierścieniowymi.

Przemienniki częstotliwości, zwłaszcza instalowane po stronie zasilania silników dużej mocy na napięcie 6 kV, są urządzeniami bardzo drogimi i zajmującymi wiele miejsca, tak że często stanowi to istotną przeszkodę w ich zastosowaniu. W artykule przedstawiono odmienną od dotychczas stosowanych [2] konstrukcję sprzęgła indukcyjnego. Zaproponowane sprzęgło (rys. 1), które może zastąpić sprzęgło hydrokinetyczne, nie wymaga zewnętrznego zasilania uzwojenia wzbudzenia. Regulacja prędkości obrotowej części biernej sprzęgła zrealizowana jest również w odmienny sposób niż w tradycyjnych sprzęgłach indukcyjnych. Urządzenie to nazwano sprzęgłem indukcyjnym samowzbudnym. Podobnie jak tradycyjne sprzęgła, posiada ono wirnik zewnętrzny, wirnik wewnętrzny oraz uzwojenie wzbudzenia i uzwojenie twornika (robocze). Obydwa rodzaje uzwojeń znajdują się na tym samym (w opisanym tu modelu) wewnętrznym wirniku. Uzwojenie twornika - poprzez układ prostowniczy zasila uzwojenie wzbudzenia. W artykule przedstawiona została zasada działania oraz podstawowe własności sprzęgła samowzbudnego.

2. BUDOWA, ZASADA DZIAŁANIA I PODSTAWOWE WŁASNOŚCI SPRZĘGŁA

Sprzęgło indukcyjne samowzbudne składa się z wirnika zewnętrznego oraz z wirnika wewnętrznego (rys. 1). Wirnik zewnętrzny sprzężony jest z wałem (6) silnika napędzającego, natomiast wirnik wewnętrzny z wałem (7) urządzenia napędzanego. Wirnik zewnętrzny (1) ma kształt cylindra, który od strony wewnętrznej posiada zęby (5) równomiernie rozmieszczone, przy czym szerokość zębów jest równa szerokości żłobków. Wirnik wewnętrzny (2) ma kształt walca, na którego obu końcach znajdują się ciasno osadzone pakiety blach (9) ze żłobkami, w których ułożone są cewki uzwojenia roboczego (4). Między tymi pakietami blach nawinięte jest współosiowo z wirnikiem uzwojenie wzbudzenia (3), które wytwarza strumień magnetyczny unipolarny Φ_w .

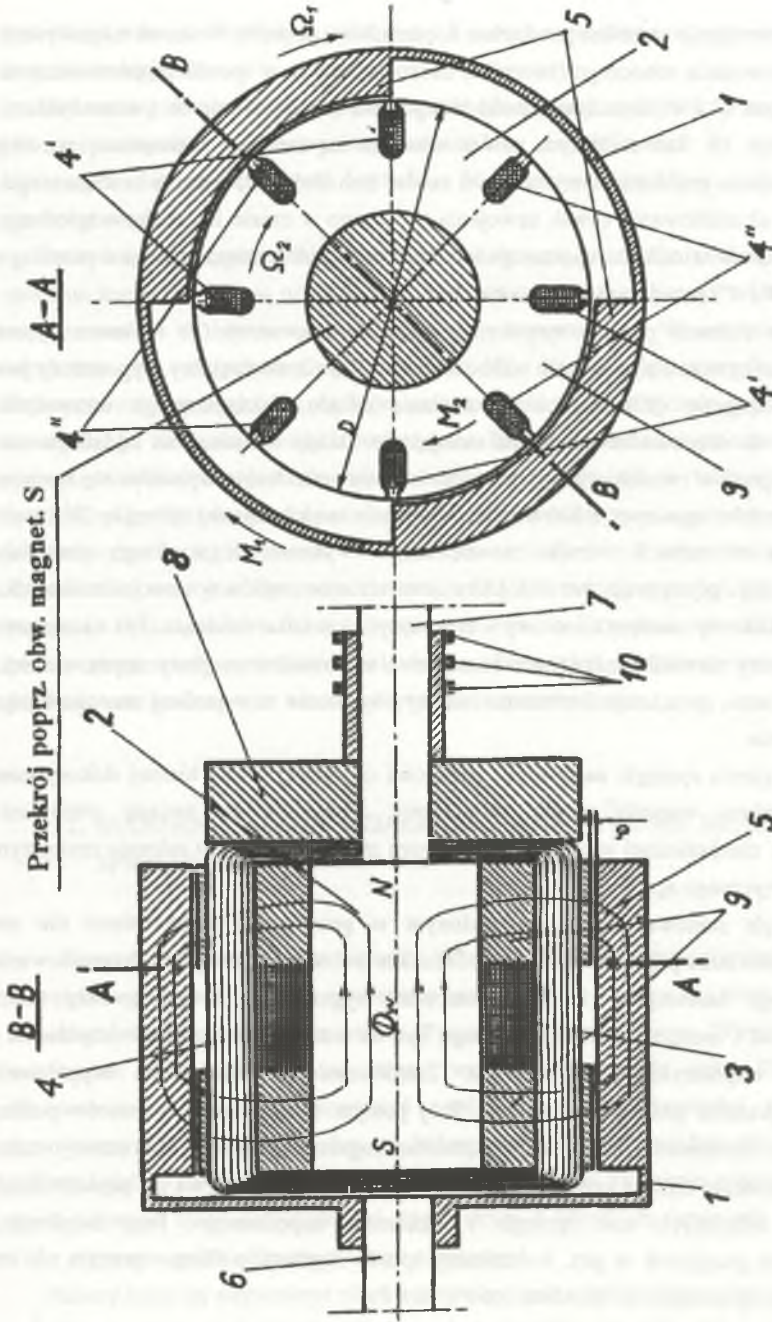
Pakiety blach są elementami rdzenia twornika i jednocześnie pełnią rolę nabiegowników N i S dla strumienia wzbudzenia. Między zębami wirnika zewnętrznego a pakietami blach o

kształcie walca występuje szczelina powietrzna δ , przez którą przenika strumień magnetyczny ϕ_w . Cewki (4) uzwojenia roboczego (twornika) ukształtowane są w sposób przedstawiony na rys. 2, gdzie przez 4' i 4'' oznaczono cewki różnych faz (koresponduje to z oznaczeniami przyjętymi na rys. 1). Szerokość tych cewek mierzona na średnicy zewnętrznej wirnika wewnętrznego równa jest dokładnie szerokości zębów (lub żłobków) wirnika zewnętrznego. Dzięki takiemu ukształtowaniu cewek uzwojenia roboczego w czasie ich ruchu względnego w stosunku do zębów wirnika zewnętrznego indukuje się w nich napięcie rotacji o przebiegu prostokątnym (4' i 4'') przedstawionym na rys. 3.

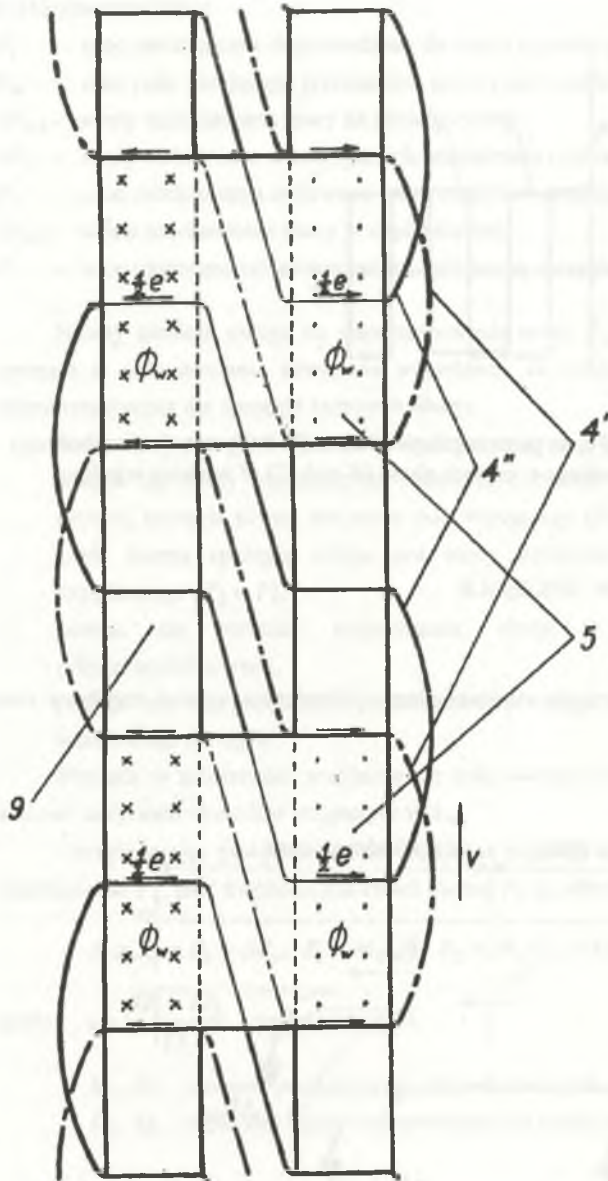
Uzwojenie robocze poprzez tyrystorowy układ prostowniczy (8) umieszczony na wirniku wewnętrznym zasilają uzwojenie wzbudzenia (3). Wirnik wewnętrzny wyposażony jest w pierścienie ślizgowe (10) służące do zasilania układu elektronicznego wyzwalania tyrystorów oraz do doprowadzenia sygnału sterującego. Dzięki wzajemnemu oddziaływaniu dynamicznemu prądów twornika (roboczych) i strumienia wzbudzenia wytwarza się moment obrotowy o kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania części czynnej sprzęgła. W czasie pracy sprzęgła w zębach wirnika zewnętrznego wykonanych z litego materiału ferromagnetycznego płyną prądy wirowe, które niezależnie od prądów w uzwojeniu twornika wytwarzają dodatkowy moment obrotowy o tym samym kierunku działania. Dla zadziałania sprzęgła wystarczy niewielki magnetyzm szczątkowy w obwodzie magnetycznym, a dzięki silnemu dodatniemu sprzężeniu zwrotnemu między obydwoma uzwojeniami następuje jego szybkie nasycenie.

W tradycyjnym sprzęgle nastawianie prędkości obrotowej części biernej dokonywane jest przez zmianę wartości prądu wzbudzenia. Powoduje to zmianę pochylenia charakterystyki mechanicznej sprzęgła, a tym samym zmianę poślizgu w zakresie mniejszym od poślizgu krytycznego s_k .

W sprzęgle samowzbudnym wyposażonym w prostowniki niesterowane nie ma możliwości nastawiania prędkości obrotowej. Jednakże jest to możliwe, jeżeli do prostowania prądu roboczego zastosujemy tyrystory sterowane sygnałem z zewnątrz. Przy takim rozwiązaniu moc i moment przenoszone mogą być na urządzenie napędzane impulsami o regulowanym współczynniku wypełnienia. Zmniejszanie współczynnika wypełnienia powoduje zwiększanie poślizgu i odwrotnie. Przy pełnym wysterowaniu tyrystorów poślizg osiąga wartość minimalną. Przy takim sposobie regulacji prędkości obrotowej mimo nieciągłości momentu zmiana prędkości obrotowej części biernej odbywa się płynnie dzięki bezwładności wirujących mas sprzęgła i urządzenia napędzanego. Przy założeniach upraszczających przyjętych w pkt. 3 odmienny sposób regulacji poślizgu sprzęgła nie ma wpływu na jego sprawność, co przedstawiono w pkt. 3.

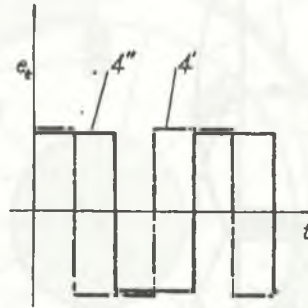


Rys. 1. Schematyczny przekrój wzdłużny (B-B) i poprzeczny (A-A) sprzęgła indukcyjnego samowzbudnego
 Fig. 1. Diagrammatic longitudinal- (B-B) and cross- (A-A) section of inductive self-excited clutch



Uwaga:
 części cewek przykryte
 zębami narysowane są
 liniami cienkimi.

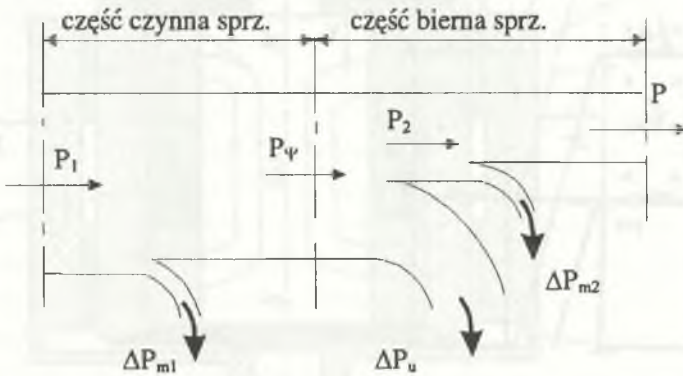
Rys. 2. Kształt i rozmieszczenie cewek poszczególnych faz 4' i 4'' uzwojenia roboczego
 Fig. 2. Shape and location of each phase 4' and 4'' coils of working winding



Rys. 3. Przebieg napięcia rotacji e_t na poszczególnych fazach ($4'$ i $4''$) uzwojenia roboczego
 Fig. 3. Time curve of rotation voltage e_t on each phase ($4'$ and $4''$) of working winding

3. ROZPŁYW MOCY W SPRZĘGLE

Dla przedstawionego sprzęgła samowzbudnego obowiązuje wykres rozplywu mocy Sankeya z rys. 4



Rys. 4. Wykres Sankeya rozplywu mocy w sprzęgle samowzbudnym przy poślizgu $s = 0,5$
 Fig. 4. Sankey's diagram of power flow of self-excited clutch for slip $s = 0,5$

w którym oznaczono:

- P_1 - moc mechaniczna doprowadzona do części czynnej sprzęgła,
- P_w - moc pola wirującego przenoszona przez pole z części czynnej na bierną,
- ΔP_{m1} - straty mechaniczne mocy na części czynnej,
- ΔP_u - straty elektryczne w uzwojeniach wzbudzenia i roboczym na części biernej sprzęgła,
- P_2 - moc mechaniczna oddawana przez część bierną sprzęgła,
- ΔP_{m2} - straty mechaniczne mocy w części biernej,
- P - moc użyteczna oddawana przez część bierną sprzęgła do mechanizmu napędzanego.

Należy zwrócić uwagę na niewystępowanie mocy P_w doprowadzanej z zewnątrz do sprzęgła w celu zasilania uzwojenia wzbudzenia ze źródła prądu stałego. Jest to cechą charakterystyczną dla sprzęgła samowzbudnego.

Rozważania przeprowadzone zostały przy następujących założeniach upraszczających:

- pomija się straty mechaniczne, zatem moc mechaniczna doprowadzona do części czynnej sprzęgła równa jest mocy pola wirującego ($P_1 = P_w$), a moc oddawana przez część bierną sprzęgła równa jest mocy użytecznej oddawanej do mechanizmu napędzanego ($P_2 = P$),
- pomija się strumień rozproszenia, straty w żelazie i w przyrządach półprzewodnikowych,
- pomija się wpływ indukcyjności uzwojeń roboczych i wzbudzenia na pracę i właściwości sprzęgła.

Ponadto w założeniach przyjmuje się stałą wartość strumienia $\Phi = \Phi_w$ odpowiadającą stanowi nasycenia obwodów magnetycznych.

Uwzględniając powyższe założenia można napisać, że moc pola wirującego P_w , moc mechaniczna P_1 , moc mechaniczna części biernej P_2 są odpowiednio równe

$$P = P_1 = P_2 + \Delta P_u, \quad P_1 = M_1 \Omega_1, \quad P_2 = M_2 \Omega_2 = M_2 \Omega_1 (1 - s), \quad (1)$$

gdzie: $s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}$ - poślizg sprzęgła,

M_1, M_2 - moment przekazywany odpowiednio przez część czynną, bierną sprzęgła,
 Ω_1, Ω_2 - prędkości kątowe odpowiednio dla części czynnej, biernej sprzęgła.

Przy przyjętych założeniach można wykazać, że moment przenoszony przez część bierną sprzęgła (M_2) na urządzenie napędzane jest równy momentowi przekazywanemu przez część czynną (M_1), straty w uzwojeniach $\Delta P_u = P_1 s$, moc mechaniczna oddawana przez część bierną sprzęgła $P_2 = P_1 (1 - s)$, sprawność $\eta = 1 - s$, jak w tradycyjnym sprzęgle.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzone zostały badania sprzęgła o następujących parametrach:

$D = 0,227 \text{ m}$	- średnica zewnętrzna wirnika wewnętrznego,
$l = 0,1 \text{ m}$	- długość czynna boku cewki uzwojenia twornika,
$m = 2$	- ilość faz uzwojenia twornika,
$z_1 = 36$	- ilość zwojów w jednej fazie uzwojenia twornika,
$R_1 = 1,40 \ \Omega$	- rezystancja jednej fazy uzwojenia twornika,
$z_w = 86$	- ilość zwojów uzwojenia wzbudzenia,
$R_w = 0,14 \ \Omega$	- rezystancja uzwojenia wzbudzenia
$S = 0,008 \text{ m}^2$	- przekrój obwodu magnetycznego strumienia wzbudzenia
$\delta = 0,4 \text{ mm}$	- szczelina powietrzna,
$Z_z = 9$	- ilość zębów (żłobków) wirnika zewnętrznego,
$c_1 = 9$	- ilość cewek w jednej fazie uzwojenia twornika,
$Z_w = 36$	- ilość żłobków wirnika wewnętrznego.

Badania przeprowadzono przy zatrzymanym wirniku wewnętrznym i nastawianej parametrycznie prędkości obrotowej wirnika zewnętrznego napędzanego silnikiem prądu stałego. Zatrzymany wirnik umożliwił bezpośrednie badanie parametrów obwodów wirnika wewnętrznego dzięki wyprowadzeniu ich przez centralnie wywiercony w wale otwór na zewnątrz wirnika. Ponadto mierzona była prędkość obrotowa wirnika zewnętrznego oraz prąd i napięcie silnika napędzającego. Zdejmowano oscylogramy napięć i prądów w obwodach wirnika wewnętrznego. Prąd twornika prostowany był jedno- i dwupołkowo prostownikami niesterowanymi, jak również tyrystorami sterowanymi fazowo. W przypadku prostowników sterowanych układ wyzwalania tyrystorów wyposażony był w zabezpieczenie od przeciążeń, którego działanie polegało na blokowaniu impulsów wyzwalających tyrystory w przypadku przekroczenia nastawionej wartości skutecznej prądu twornika. Warunki przeprowadzania pomiarów przy zatrzymanym wirniku wewnętrznym nie dawały możliwości badania sprawności sprzęgła. Przy wzbudzeniu obcym i zatrzymanym wirniku wewnętrznym dla różnych wartości prędkości obrotowej wirnika zewnętrznego n_{1m} zdjęto charakterystyki napięcia twornika w funkcji prądu wzbudzenia $U_1 = f(I_w)$. Charakterystyki $U_1 = f(I_w)$ przedstawiono na rys. 5. Z charakterystyk tych wynika stan nasycenia sprzęgła, który występuje już przy prądzie $I_w \approx 8 \text{ A}$, czyli około 20% prądu długotrwałego obciążenia uzwojenia wzbudzenia.

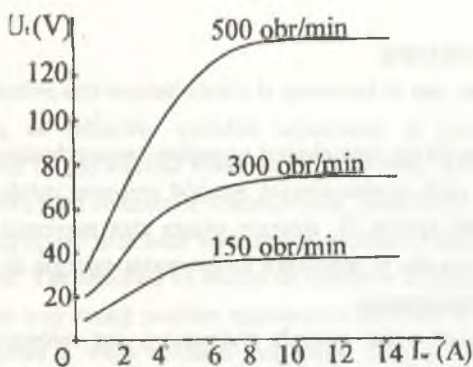
Mimo braku przepływu prądów w uzwojeniach twornika przy wzbudzeniu obcym badany model sprzęgła przenosił moment pochodzący od prądów wirowych przepływających

w zębach wirnika zewnętrznego. Moment ten równy jest około 25% momentu przenoszonego przez sprzęgło podczas pracy samowzbudnej przy prądzie wzbudzenia o tej samej wartości (około 15 A).

Przy wzbudzeniu własnym zdjęto charakterystyki momentu w funkcji prędkości obrotowej wirnika zewnętrznego n_{1m} $M = f(n_{1m})$ oraz prądu wzbudzenia w funkcji prędkości obrotowej wirnika zewnętrznego $I_w = f(n_{1m})$ przy jedno- i dwupołówkowym prostowaniu prądów twornika prostownikami niesterowanymi (rys. 6). Z rys. 6 zauważa się, że przy prostowaniu jednopółkowym charakterystyka $M = f(n_{1m})$ jest bardziej stroma i że dla wartości prędkości obrotowej wirnika zewnętrznego około 220 obr/min charakterystyki „jednopółkowa” (krzywa 1) i „dwupołówkowa” (krzywa 2) przecinają się.

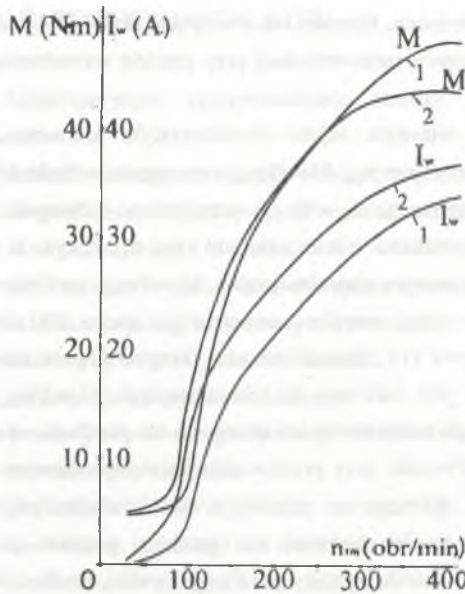
Charakterystyczne jest zarówno dla charakterystyk $M = f(n_{1m})$, jak też $I_w = f(n_{1m})$ wyraźne przegięcie i nagłe zwiększenie ich stromości dla prędkości obrotowej części czynnej około 90÷100 obr/min. Ponadto przy prostowaniu jednopółkowym moment maksymalny sprzęgła jest większy. Różnica w przebiegu tych charakterystyk spowodowana jest oddziaływaniem indukcyjności uzwojeń na przebieg prądów przy różnym sposobie prostowania. Z przebiegu charakterystyk $I_w = f(n_{1m})$ wynika, że dla całego zakresu mierzonej prędkości obrotowej części czynnej przy prostowaniu jednopółkowym (krzywa 1) prąd wzbudzenia jest mniejszy niż przy prostowaniu dwupołówkowym (krzywa 2).

Próby przeprowadzone przy zastosowaniu prostowników sterowanych wykazały możliwości płynnej i stabilnej regulacji poślizgu sprzęgła przez fazowe sterowanie tyrystorów, zwłaszcza przy prostowaniu jednopółkowym. Regulacja taka powoduje zmianę wartości poślizgu krytycznego s_k zwiększając ją przy zmniejszaniu kąta otwarcia tyrystorów.



Rys. 5. Charakterystyki $U_t = f(I_w)$ przy wzbudzeniu obcym dla różnych poślizgów (obrotów wirnika zewnętrznego)

Fig. 5. Characteristics of $U_t = f(I_w)$ for separate excitation for different slips (rotational speeds of external rotor)



Rys. 6. Charakterystyki $M = f(n_{1m})$ i $I_w = f(n_{1m})$ przy wzbudzeniu własnym dla prostowania jednopółkowego (krzywa ozn. 1) i dwupółkowego (krzywa ozn. 2)

Fig. 6. Characteristics of $M = f(n_{1m})$ and $I_w = f(n_{1m})$ for self-excited working clutch for single-wave (curve 1) and full-wave (curve 2) rectification

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione w artykule sprzęgło jest sprzęgłem samowzbudnym, co jest jego zaletą i jedną z podstawowych cech wyróżniających spośród sprzęgieł indukcyjnych. Jak wynika z przeprowadzonych badań (punkt 4), sprzęgło osiąga stan nasycenia już przy niewielkich obciążeniach. Jest to korzystne w przypadku zastosowania sprzęgła do nastawiania prędkości obrotowej urządzenia napędzanego.

Moment przenoszony przez sprzęgło wytwarzany jest zarówno przez prądy robocze w uzwojeniach twornika, jak też przez prądy wirowe w zębach wirnika zewnętrznego w przypadku wykonania ich z litego ferromagnetyku. Prądy wirowe wytwarzają jednak około 25% całkowitego momentu.

Należy jednak zwrócić uwagę na celowość prostowania dwupołówkowego prądów roboczych, co przedstawiono w pkt. 4 z uwagi na większe nachylenie charakterystyki $M = f(n_{1m})$ i mniejszy moment maksymalny mimo większego prądu wzbudzenia.

Dalsze badania prototypów sprzęgieł, szczególnie na stanowiskach eksploatacyjnych, powinny koncentrować się między innymi na określeniu ich rzeczywistej sprawności w zależności od poślizgu przy zastosowaniu zabezpieczeń od przeciążeń.

LITERATURA

1. Stępniewski M.: Pompy. WNT, Wyd. II, Warszawa 1985.
2. Pełczewski W.: Sprzęgła elektromagnetyczne. WNT, Wyd. I, Warszawa 1965.
3. Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Wyd. VI, Warszawa 1976.

Recenzent: Dr hab. inż. Ernest Mendrela, prof. WSI w Opolu

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 grudnia 1995 r.

Abstract

The inductive self-excited clutch is presented in the paper. This clutch can replace the fluid coupling as infinitely variable adjustment of pump and fan rotational speed. The construction of self-excited clutch is different from traditional, separate-excited clutch. The self-excited clutch consists of: external rotor, made from ferromagnetic material only and internal rotor equipped with both working and excitation winding and rectifier which rectifies working current. The rectified by diodes or thyristors working current supplies the excitation winding. In this way strong positive regenerative feedback is made which saturates the clutch rapidly. Therefore a weak residual magnetism only is sufficient to operate the clutch. The adjustment of rotational speed is possible by the clutch equipped with phase controllable thyristor rectifier.

Some motion parameters of the clutch are estimated. The efficiency and other parameters calculated under some simplifications show the similarity to separate-excited clutch parameters.

The experiment carried out on prototype unit confirmed rapid magnetic saturation during the work and possibility of infinitely variable adjustment of rotational speed. The interesting feature of the clutch is obtaining better motion characteristics for single-wave than for full-wave rectification of working current. The conditions of experiment (the internal rotor was stopped) made the real efficiency measurement impossible. Such measurements can be made at work station only.