ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976
Seria: Górnictwo z. 72 Nr kol. 471

Zygfryd Liberus

O STOSOWALNOŚCI NAPĘDU ASYNCHRONICZNEGO DO MASZYN WYCIĄGOWYCH

Streszczenie. Na tle właściwości różnych rozwiązań napędu asynchronicznego wskazano jego zakresy przydatności dla różnych maszyn wyciągowych. Pokreślono wyższość ciągłej zmiany oporu dodatkowego nad zmianą stopniowaną. Podano propozycję i wstępne wyniki prób nowego rozwiązania rozrusznika płynowego.

1. Wstęp

Rozwój maszyn wyciągowych oraz ich napędów trwa. Narzucony jest między innymi: wzrostem zadań transportowych, głębokością szybów, zastępowaniem przedziałów drabinowych wyciągami awaryjnymi, chęcią podwyższenia sprawności energetycznej, wprowadzaniem sterowania z klatki.

Napęd elektryczny ma spełniać wszelkie wymagania maszyny roboczej. Zatem z jakościowym (typ, moc, przeznaczenie) oraz ilościowym rozwojem maszyn wyciągowych związane są próby konstruowania i projektowania dla nich takich układów napędu elektrycznego, które potrafiłyby spełnić jednocześnie wszystkie racjonalne wymagania techniczno-ekonomiczno-ruchowe. Dodatkowymi powodami tych poszukiwań są względy gospodarcze i przesłanki handlowe.

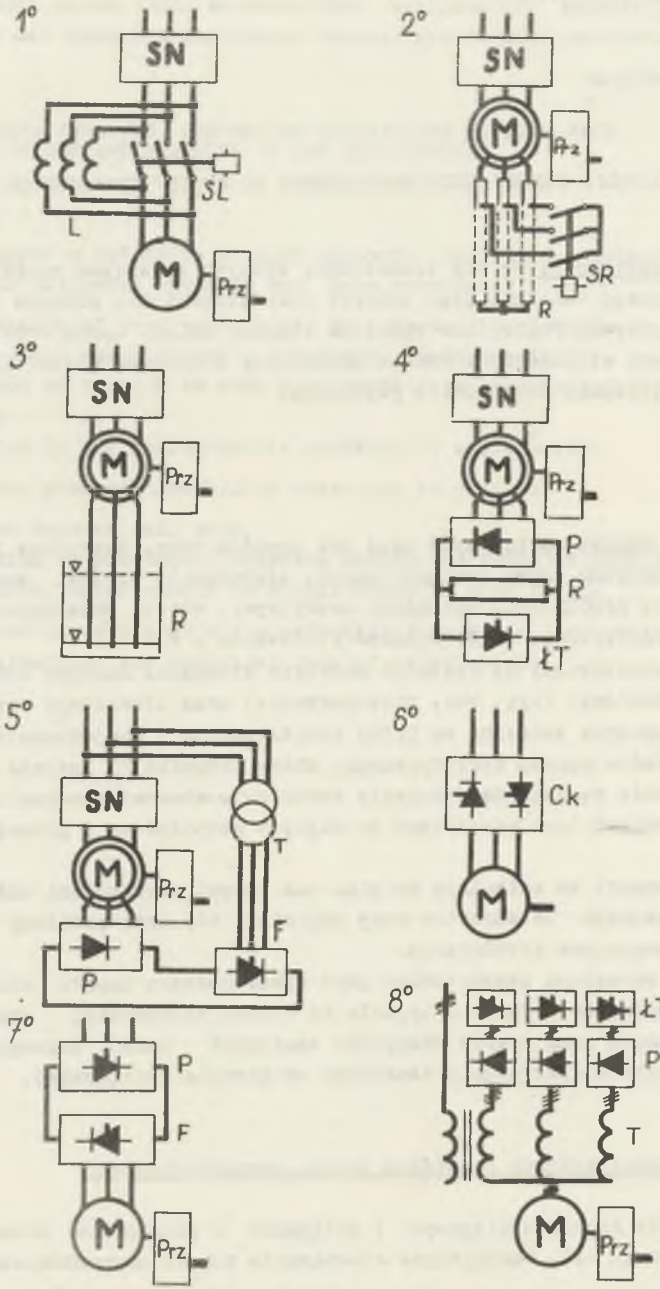
Okoliczności te skłaniają do prac nad nowymi szczegółami układów napędu elektrycznego. Ze wzrostem mocy pojawiają się nowe problemy i zjawiska uboczne wymagające rozwiązania.

Zawsze aktualnym zagadnieniem jest wybór rodzaju napędu elektrycznego maszyny wyciągowej. Punktem wyjścia do wyboru najbardziej ekonomicznego rodzaju napędu jest przede wszystkim znajomość zadań transportowych i współczynnika wykorzystania czasowego urządzenia wyciągowego.

2. Właściwości różnych rozwiązań napędu asynchronicznego

Do napędu maszyn wyciągowych i wciągarek w górnictwie stosowane są, względnie mogą być, następujące rozwiązania napędu asynchronicznego:

1° silnik klatkowy jedno-, dwu- lub wielobiegowy,
2° silnik pierścieniowy z rozrusznikiem metalowym o stopniowanej zmianie rezystancji,
3° silnik pierścieniowy z rozrusznikiem cieczowym o płynnej zmianie rezy-



Rys. 1. Ilustracja ośmiu wersji napędu asynchronicznego

Oznaczenia: SN - styczniki nawrotne, L - dławiki, SL - stycznik zwierania dławików, Prz - przekładnia, R - opornik rozruchowy, SR - styczniki rozruchowe, P - prostownik niesterowany- ŁT - łącznik tyrystorowy, F - falownik, T - transformator, CK - cyklokonwertor

stancji,

4° silnik pierścieniowy z tyrystorowym modulatorem rezystacji,

5° silnik pierścieniowy w układzie tyrystorowej kaskady podsynchronicznej,

6° silnik klatkowy zasilany z bezpośredniego przemiennika częstotliwości z komutacją sieciową (cyklokonwertor),

7° silnik klatkowy zasilany z przemiennika częstotliwości z pośredniczącym obwodem prądu stałego,

8° silnik klatkowy zasilany z bezpośredniego przemiennika częstotliwości z komutacją wewnętrzną.

Zobrazowanie wyżej wymienionych ośmiu wersji napędu przedstawiono dla porównania na rys. 1.

Wersja 1° nadaje się do urządzeń o mocy do około 100 kW i prędkości jazdy ustalonej do około 3 m/s, z powodu dużych prądów rozruchowych i niezadowalającej sterowności. Prostota, bardzo mała awaryjność, taniość i pewność hamowania odzyskowego czynią ten napęd szczególnie przydatnym dla urządzeń awaryjnych i pomocniczych do opuszczania materiałów. Przykładem tej wersji jest konstrukcja ZKMPW w Gliwicach z silnikiem dwubiegowym [2]. Wyniki pomiarów i badań eksploatacyjnych tego napędu są pozytywne [1].

Wspólną właściwością wersji 1° do 4° są straty energii w obwodzie wirnika podczas rozruchu, której ilość równa się w przybliżeniu sumie energii kinetycznej nadanej układowi elektromechanicznemu i pracy wykonanej przez silnik podczas rozruchu. Stąd tendencje do minimalizowania czasu rozruchu i prędkości jazdy ustalonej.

Wspólną cechą wersji 1° do 8°, z ewentualnym wyjątkiem wersji 6°, jest konieczność redukcji prędkości obrotowej, czyli instalowania przekładni. Budowa napędu asynchronicznego bezpośredniego ma sens praktyczny przy wykorzystaniu silnika wolnoobrotowego o częstotliwości znamionowej rzędu kilkunastu herców. Konstruowanie silnika asynchronicznego o prędkości znamionowej do 1,5 obr/s przy częstotliwości znamionowej 50 Hz nie ma uzasadnienia technicznego z uwagi na zasadę pracy maszyny indukcyjnej.

Wspólną właściwością wersji 2° do 4°, w przypadku hamowania dynamicznego prądem stałym, jest:

- konieczność opuszczania nadwagi bądź naczynia cięższego, dla uzyskania stabilnej prędkości rewizyjnej rzędu (0,5÷1,0) m/s,
- brak odzyskowego hamowania elektrycznego w okresie zwalniania (opóźniania),
- nieekonomiczna praca podczas ciągnienia z prędkością wleczną poprzedzającą sygnał "stop".

Zastąpienie hamowania dynamicznego hamowaniem niską częstotliwością eliminuje powyższe trzy niedogodności. Okupić to trzeba większą złożonością budowy źródła niskiej częstotliwości, w stosunku do źródła prądu stałego.

Wersje 2° i 3° stanowią klasyczny napęd asynchroniczny niezależnie od sposobu hamowania. Klasyczny napęd asynchroniczny osiągnął wysoki stopień

rozwoju i szerokie zastosowanie. Odznacza się zawsze niższymi kosztami inwestycyjnymi niż napęd Leonarda lub napęd przekształtnikowy prądu stałego. Można wyliczyć [4], że koszt inwestycyjny napędu asynchronicznego wynosi około: 35% kosztu napędu Leonarda bezpośredniego, 50% kosztu napędu Leonarda pośredniego, 27% kosztu napędu przekształtnikowego bezpośredniego. Koszty eksploatacyjne napędu asynchronicznego mogą być niższe niż napędu Leonarda lub przekształtnikowego. Aby to uzyskać, trzeba dobrać dostatecznie małą prędkość jazdy ustalonej oraz dopuszczalnie duże przyspieszenie. Klasyczny napęd asynchroniczny może być budowany na dowolnie dużą moc, pod warunkiem dysponowania odpowiednimi przekładniami. Nie generuje on zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych.

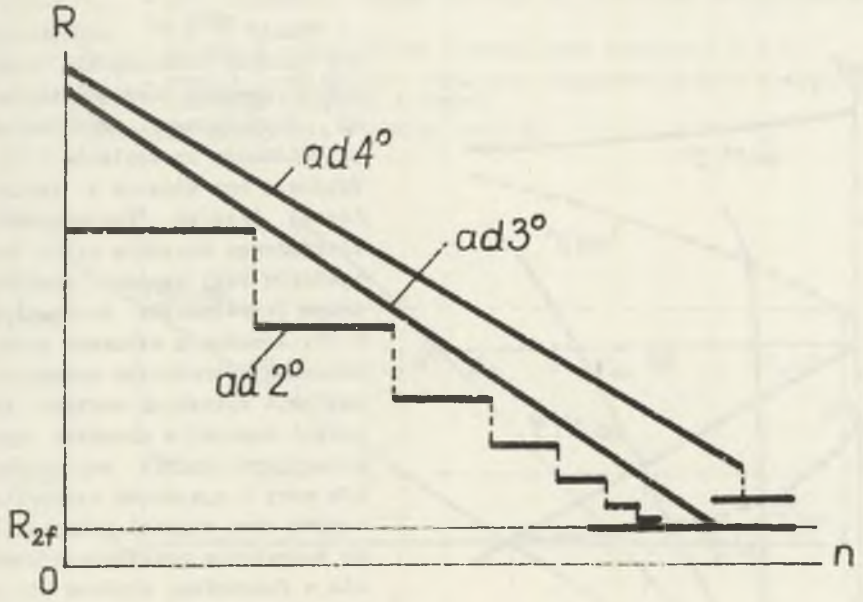
Wersja 3° ma przewagę ekonomiczną nad wersją 2°, albowiem straty regulacji podczas rozruchu są niższe przy płynnej zmianie rezystancji, a rozrusznik płynowy na ogół jest tańszy. Wady rozruszników płynowych omówione są w pkt 4.

Wersja 4° różni się od wersji 3° zakresem zmiany rezystancji, co zilustrowano na rys. 2, a także sposobem tej zmiany, co zasadniczo wpływa na przebieg prądu wirnika - rys. 3. Obszar niesterowalności rezystancji nie stanowi istotnej przeszkody ruchowej. Natomiast wzrost poślizgu ustalonego oraz skutki impulsowego charakteru prądu wirnika (obniżenie sprawności i współczynnika mocy silnika, nieznaczne zniekształcenie prądu stojana) oraz nasilające się ze wzrostem mocy niedogodności techniczno-ruchowe przerywacza tyrystorowego prądu stałego, nie czynią wersji 4° zbyt konkurencyjnej wobec klasycznego napędu asynchronicznego.

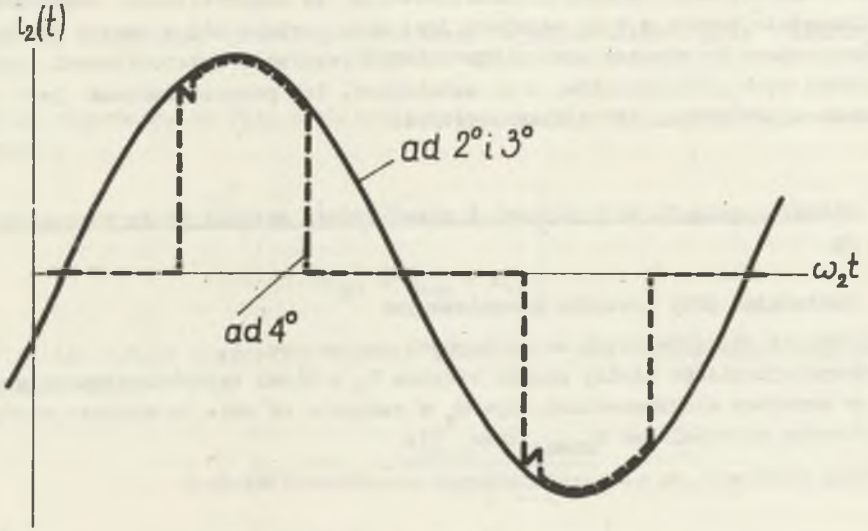
Rozwiązania napędu wg wersji 5° do 8° w równym stopniu przesyższają klasyczny napęd asynchroniczny wyeliminowaniem strat regulacji. Natomiast ustępują mu znacznie pod względem prostoty budowy, łatwości wyprodukowania, przebiegu współczynnika mocy, kosztu inwenstycyjnego, ujemnego wpływu na sieć elektroenergetyczną i sprawności ustalonej, tj.sprawności przy jeździe ustalonej z prędkością znamionową.

Wersja 5° odznacza się stałym zamknięciem obwodu wirnika przez dwa przekształtniki półprzewodnikowe. Powoduje to, w stosunku do napędu klasycznego, obniżenie ustalonej sprawności i współczynnika mocy, co zobrazowano na rys. 4. Podobieństwo wersji 5° do napędu przekształtnikowego prądu stałego, o którym istnieje szerokie rozeznanie teoretyczno-technologiczno-eksploatacyjne, stwarza perspektywy budowania jej na moc do 8 MW przy napędzie czterosilnikowym. Z teoretycznego porównania kosztów ruchu i kosztów eksploatacji różnych rozwiązań napędu asynchronicznego wynika, że wersja 5° odznacza się najniższymi kosztami eksploatacji [5].

Wersja 6° charakteryzuje się koniecznością zbudowania silnika asynchronicznego na częstotliwość znamionową kilkanaście herców, co pozwoli wyeliminować przekładnię i wykorzystać moc znamionową silnika. Przedsięwzięcie takie wydaje się nieopłacalne, gdyż sprawność energetyczna silnika asynchronicznego zasilanego napięciem odkształconym o niskiej częstotliwości maleje nawet o kilkanaście procent. Zastąpienie silnika klatkowego synchronicznym wydaje się celowe. Regulowane napędy synchroniczne zasila-

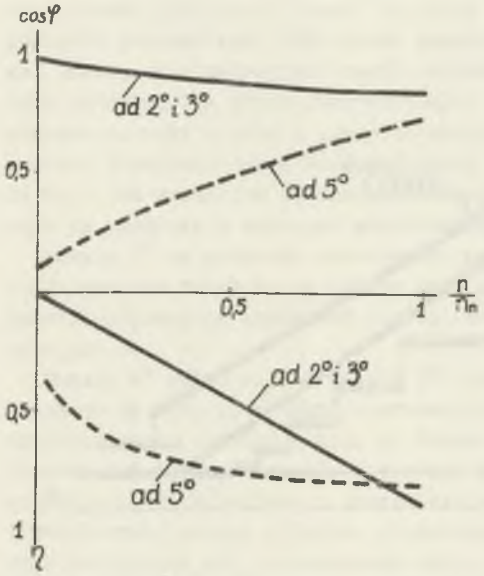


Rys. 2. Porównanie zakresu i jakości zmiany oporu w obwodzie wirnika



Rys. 3. Przebieg prądu w uzwojeniu fazy wirnika

ne z cyklokonwertora pracują w przemyśle poza górnictwem. Ich moce sięgają 4 MW.



Rys. 4. Poglądowy przebieg współczynnika mocy i sprawności

Wersje 7° i 8° odznaczają się jeszcze bardziej niż wersja 6° pewnymi niedogodnościami technicznymi zbudowania przemiennika na napięcie 6 kV. Wynikają one głównie z zachodzącej jeszcze konieczności szeregowego łączenia kilku tyrystorów przy napięciu znamionowym przemiennika wynoszącym 6 kV. Komutacja sztuczna przemiennika pośredniego wymaga oscylacji znacznych wartości energii biernej w obwodzie komutacyjnym, obniża współczynnik mocy i sprawność całkowitą napędu oraz stanowi potencjalne zagrożenie możliwością zwarcia w falowniku, większe niż w cyklokonwertorze. Zakres płynnej regulacji prędkości jazdy naczyń i maszyny napędzanej wg wersji 7° lub 8° napędu wynosi praktycznie od zera do prędkości znamionowej. Eliminowanie przekładni przez zastosowanie silnika asynchronicznego na częstotliwość znamionową kilkanaście herców w tych wersjach jest mniej celowe niż w wersji 6°. Nie wykorzystano by wówczas szerokiego zakresu regulacji częstotliwości wyjściowej tych przemienników, a co ważniejsze, ich pewność ruchowa jest uznawana jako niższa niż cyklokonwertora.

3. Straty regulacji przy płynnej i stopniowanej zmianie oporu rozruchowego

Zakładając przy rozruchu stopniowanym:

- przebieg charakterystyk mechanicznych jak na rys. 5,
- proporcjonalność między prądem wirnika I_2 silnika asynchronicznego a jego momentem elektromechanicznym M_e w zakresie od zera do momentu rozruchowego maksymalnego M_{ermax} (rys. 3),

straty regulacji na pierwszym stopniu rozruchowym wynoszą

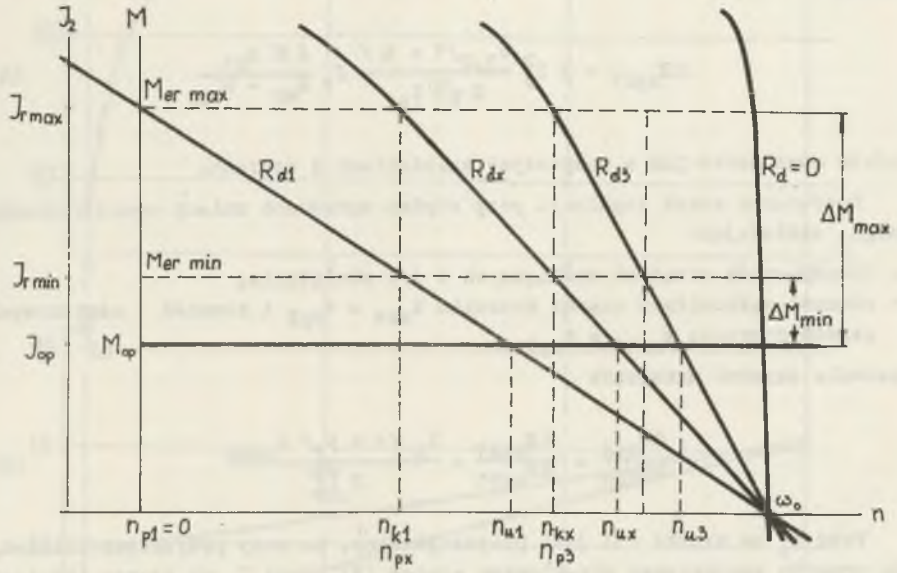
$$\Delta E_{rst1} = 3\, I_{z1}^2 \frac{U_{2,0}}{\sqrt{3}\, I_{rmax}} J_z \frac{2\pi n_{u1}}{\Delta M_{max}} \ln \frac{\Delta M_{max}}{\Delta M_{min}} \qquad (1)$$

gdzie: I_{z1} – prąd zastępczy fazowy wirnika na pierwszym stopniu rozruchowym,

$U_{2,0}$ – napięcie międzyfazowe wirnika przy prędkości n = 0,

J_z – moment bezwładności zastępczy elementów układu elektromechanicznego będących w ruchu,

pozostałe oznaczenia – jak na rys. 5.



Rys. 5. Przybliżony przebieg charakterystyk mechanicznych przy rozruchu stopniowanym

Można udowodnić, że przy spełnieniu wyżej uczynionych założeń zachodzą związki

$$\left.\begin{aligned} I_{z1} &= I_{zx} = I_z \\ M_{ez1} &= M_{ezx} = M_{ez} \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

przy czym moment elektromechaniczny zastępczy dla całkowitego rozruchu stopniowanego

$$M_{ez} = M_{op} + \frac{M_{ermax}\,/1 + \lambda/}{\ln \frac{1 - a}{\lambda - a}} \qquad (3)$$

gdzie: $a = \frac{M_{op}}{M_{ermax}}$, $\lambda = \frac{M_{ermin}}{M_{ermax}}$

Zakładając przy rozruchu płynnym:

- stałość momentu rozruchowego silnika M_{er} = const,
- stałość momentu oporu podczas rozruchu M_{op} = const i zarazem stałość prądu rozruchowego I_r = const,

straty regulacji w okresie rozruchu płynnego $t_{rpł1}$ równym czasowi trwania rozruchu na pierwszym stopniu rozruchowym t_{rst1} rozruchu stopniowanego wynoszą

$$\Delta E_{rpł1} = 3\, I_r^2 \frac{U_{2,0}/1 + \lambda/}{2\sqrt{3}\, I_r} J_z \frac{2\pi n_{k1}}{M_{er} - M_{op}} \tag{4}$$

gdzie oznaczenia jak w powyższych założeniach i wzorach.

Porównanie strat regulacji przy obydwu sposobach zmiany oporu rozruchowego, zakładając:

- identyczność urządzeń wyciągowych i ich obciążenia,
- równość całkowitych czasów rozruchu $t_{rst} = t_{rpł}$ i równość cząstkowych czasów rozruchu $t_{rst1} = t_{rpł1}$,

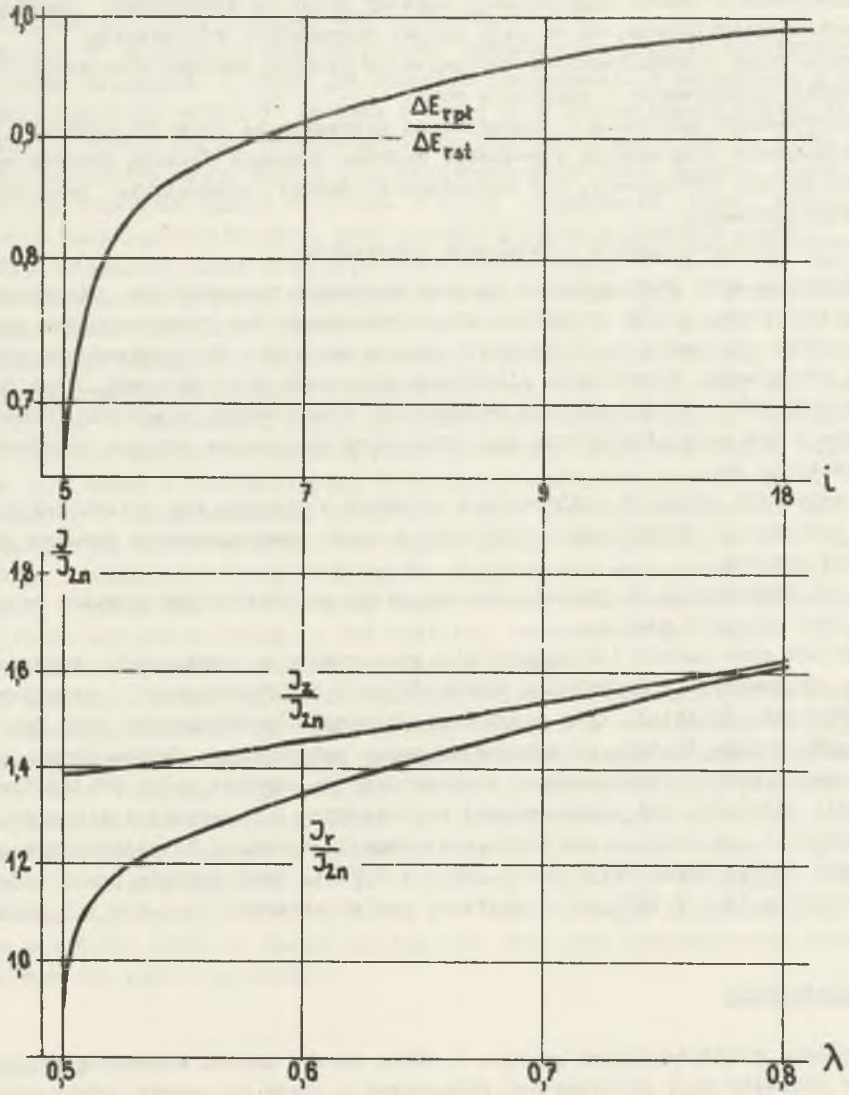
pozwala uzyskać wyrażenie

$$\frac{\Delta E_{rpł}}{\Delta E_{rst}} = \frac{\Delta E_{rpł1}}{\Delta E_{rst1}} = \frac{I_r\, /1 + \lambda/\, I_{rmax}}{2\, I_z^2} \tag{5}$$

Prąd I_r we wzorze (5) jest proporcjonalny, na mocy powyższych założeń, do momentu zastępczego określonego wzorem (3). Prąd I_z we wzorze (5) jest wartością skuteczną prądu $I_2(t)$ obliczoną w przedziale czasu od zera do t_{rst1}. Prąd I_{rmax} jest określony na rys.5, a liczba λ - za wzorem (3). Prąd zastępczy I_z jest także funkcją liczby λ. Zatem decydujący i zasadniczy wpływ na wartość stosunku strat regulacji przy obu sposobach zmiany rezystancji ma wartość liczby λ. Aby zilustrować ten wpływ, wykonano przykład obliczeniowy przyjmując wartości: $M_{ermax} = 1{,}8\, M_{en}$, $M_{op} = 0{,}9\, M_{en}$, poślizg krytyczny $s_k = 0{,}018$. Wyniki obliczeń wartości względnych prądu I_r oraz I_z, liczby stopni rozruchowych "i", oraz stosunku strat regulacji wyrażonego wzorem (5) w funkcji liczby λ podano na rys. 6.

Dalsze korzyści ekonomiczne wynikające z przejścia ze stopniowanej do płynnej zmiany oporu rozruchowego, to:

- możliwość skrócenia czasu rozruchu, a przez to dalszego obniżenia strat regulacji,
- obniżenie strat energii w uzwojeniach silnika podczas rozruchu, z czym wiąże się możliwość nieznacznego obniżenia mocy znamionowej dobieranego silnika wyciągowego.



Rys. 6. Ilustracja wpływu liczby λ na prądy zastępcze i straty regulacji

4. Propozycja nowego rozwiązania rozrusznika płynowego

Z porównania awaryjności rozrusznika płynowego (cieczowego) i metalowo-stycznikowego wynika, że w praktyce ruchowej mniej zawodny jest rozrusznik cieczowy [3]. Użytkownicy wersji 3° napędu maszyny wyciągowej często wykazują niechęć do rozruszników cieczowych, uzasadniając ją następującymi ich wadami:

- narastanie z czasem eksploatacji warstwy osadu na elektrodach zanurzonych w elektrolicie, co oznacza wzrost rezystancji rozrusznika,
- konieczność kontrolowania i utrzymywania stałego poziomu elektrolitu na skutek zgazowywania i parowania wody,
- występowanie iskrzenia i intensywnego gazowania na początku rozruchu,
- uszkodzenie rozrusznika cieczowego zagraża znacznie dłuższą przerwą ruchu maszyny wyciągowej, niż uszkodzenie sekcji rozrusznika metalowo-stycznikowego,
- wydzielanie się oparów o działaniu korozyjnym.

Pierwsze trzy niedogodności ruchowe krajowych rozruszników cieczowych przypisać można przede wszystkim niedostatecznemu ich rozwojowi, przy czym wytrącanie się osadu na elektrodach trudno zwalczyć. Dla poprawienia pracy i właściwości rozrusznika cieczowego proponuje się regulować jego rezystancję przez zmianę stopnia odsłonięcia nieruchomych elektrod. Zastosowano w tym celu pierścienie uszczelniające otaczające okrągłe elektrody. Pierścienie te:

a - pozwalają zmieniać powierzchnię elektrod stykającą się z elektrolitem,
b - oczyszczają mechanicznie elektrody z osadu nagromadzonego podczas jazdy maszyny,
c - nie dopuszczają do gromadzenia się osadu na elektrodach podczas wszelkich postojów maszyny.

Wyniki prób modelu laboratoryjnego proponowanego rozwiązania rozrusznika, zbudowanego w Instytucie Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, były pozytywne. Szczegóły konstrukcyjne będą mogły być publikowane dopiero po zgłoszeniu opisu patentowego. Krótki okres użytkowania modelu proponowanego rozrusznika nie pozwala ustalić ilościowo stopnia wyższości nad rozwiązaniami użytkowanymi w przemyśle pod względem gromadzenia się osadu i przyrostu rezystancji. W modelu laboratoryjnym uzyskano zakres zmian rezystancji $(25,6 \div 0,72)\Omega$ przy zmianie powierzchni odsłonięcia $(3,1 \div 157)$ cm^2 i gęstości powierzchniowej $(1,0 \div 0,26)$ A/cm^2.

5. Zakończenie

Spośród przedstawionych na rys. 1 ośmiu wersji napędu asynchronicznego tylko pierwsze trzy wykorzystano dotychczas w kraju do napędu górniczych urządzeń wyciągowych. Także w przyszłości klasyczny napęd asynchroniczny wydaje się być przydatny do napędu maszyn wyciągowych, zwłaszcza przy małym nasileniu ruchu. Udział strat regulacji w poborze energii dla jednego cyklu jazdy jest rzędu $(20 \div 10)$ % w zakresie głębokości szybu $(600 \div 1500)$ m i udźwigu użytecznego $(200 \div 600)$ kN [5]. W przypadku maszyn o małym współczynniku wykorzystania czasowego straty regulacji mają znaczenie trzeciorzędne.

Konieczność stosowania przekładni w napędzie asynchronicznym z silnikiem na częstotliwość znamionową 50 Hz traktowana jest dość powszechnie jako wada i jedna z barier wzrostu mocy napędu asynchronicznego. W przy-

padku zainstalowania dwóch przekładni dwuwejściowych, czyli napędu czterosilnikowego, można osiągnąć moc całkowitą do 8 MW.

Wersja 5^0 przewyższa klasyczny napęd asynchroniczny przez wyeliminowanie strat regulacji, a także pod względem sterowności. W porównaniu z napędem klasycznym wersja 5^0 posiada o około 10 % niższe koszty ruchu, oraz o ok. 5 % niższe koszty eksploatacji dla głębokości szybu 600 m, a ok. 2% - dla głębokości szybu 1500 m [5]. Konkurencyjność wobec napędu klasycznego i przydatność wersji 5^0 rośnie w miarę zwiększania zadań wydobywczych i mocy zapotrzebowanej, oraz w miarę malenia głębokości szybu.

Wyeliminowanie strat regulacji przez budowę wersji 6^0 do 8^0 nie znajduje dostatecznie silnego uzasadnienia ekonomicznego [5]. Przemienniki częstotliwości aktualnie niedogodnie jest budować na moce rzędu kilku megawatów przy napięciu 6 kV, a ich wpływ na silnik asynchroniczny i sieć elektroenergetyczną ma aspekty także negatywne. Nie wydaje się, aby wersje 7^0 i 8^0 w przyszłości mogły skutecznie konkurować z innymi rozwiązaniami napędu maszyny wyciągowej, nawet dysponując asynchronicznym silnikiem wyciągowym o częstotliwości znamionowej rzędu kilkunastu herców. Do współpracy z takim silnikiem korzystniej jest użyć cyklokonwertor. Wersja 6^0 wydaje się bardzo przydatna do napędu maszyn wyciągowych, a to z uwagi na brak przekładni i dobrą sterowność. Okoliczności wymienione wyżej i w punkcie 2 sprawiły, że dotychczas napęd ten nie zdołał wyprzeć klasycznego napędu asynchronicznego, a tym bardziej bezpośredniego napędu przekształtnikowego prądu stałego i napędu Leonarda.

W przypadku napędu głównych maszyn wydobywczych bardziej konkurencyjny dla klasycznego napędu asynchronicznego okazuje się w obecnej praktyce krajowej bezprzekładniowy napęd przekształtnikowy prądu stałego, niż wersje 5^0 do 8^0. Główną przyczyną tych tendencji raczej nie jest potrzeba wyeliminowania strat regulacji, lecz faktyczne dysponowanie silnikami wolnoobrotowymi prądu stałego. W ogólności łatwiej wykorzystać straty regulacji do celów gospodarczych niż je eliminować. Jeśli do dyspozycji będą przekładnie dwuwejściowe dużej mocy, to klasyczny napęd asynchroniczny będzie przydatny także do maszyn wyciągowych dowolnego przeznaczenia instalowanych dla szybów głębokich.

LITERATURA

[1] Baron E.: Analiza obciążalności dwubiegowego napędu asynchronicznego klatkowego szybikowej maszyny wyciągowej. Nie publ. - praca magisterska, IEiAG Pol. Śl., Gliwice 1973.

[2] Duda F.: Krajowe wyciągi szybikowe z napędem elektrycznym dla kopalń gazowych. Ref. na II Konferencję naukowo-technicznej pt. Kierunki rozwoju górniczych urządzeń wyciągowych, Pol. Śl., Gliwice 1972.

[3] Pyzio T.: Projekt i budowa rozrusznika płynowego dla napędu asynchronicznego maszyn wyciągowych szybów głębokich. Nie publ. praca magisterska, IEiAG Pol. Śl., Gliwice 1975.

[4] Szklarski L., Skalny A.: Teoretyczne zagadnienia maszyn wyciągowych. Cz. 1, PWN, Warszawa 1975.

[5] Analiza przydatności napędów asynchronicznych dla maszyn wyciągowych szybów głębokich - etap I, nie publ. praca naukowo-badawcza, IEiAG Pol. Śl., Gliwice 1974.

О ПРИМЕНЯЕМОСТИ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ДЛЯ ПОДЪЁМНЫХ МАШИН

Р е з ю м е

На основе своеобразия различных решений асинхронного привода показаны возможности применения его для разных подъёмных машин. Отмечено преимущество постоянного изменения добавочного сопротивления над изменением последовательных. Даются предложения и предварительные результаты испытаний жидкостного пускателя нового типа.

ON THE APPLICABILITY OF AN ASYNCHRONOUS DRIVE TO THE HOISTING MACHINES

S u m m a r y

Against the background of peculiarities of different asynchronous drives, the paper shows the ranges of its usability for the different hoisting machines. The superiority of a continuous change of additional resistance over the gradual change, has been emphasised.
The new suggestion and some initial results of tests with the new solution of a liquid starter, have been given.