ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1970

Seria: ELEKTRYKA z. 27 Nr kol. 274

TADEUSZ RODACKI, ANDRZEJ WOLSKI

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

ZAUTOMATYZOWANE KOPALNIANE MASZYNY WYCIĄGOWE W UKŁADZIE LEONARDA

Streszczenie: W pracy zajęto się maszynami wyciągowymi z automatycznym sterowaniem, biorąc za podstawę 3 różne rozwiązania, wybrane z będących w eksploatacji w polskim przemyśle węglowym.
Omówiono ich budowę i zasadę działania, porównano charakterystyki statyczne i własności w stanach dynamicznych. Podano szereg praktycznych wniosków.

1. Wstęp

W polskim przemyśle górniczym coraz częściej i coraz chętniej stosowane są maszyny wyciągowe z układem automatycznego sterowania. Dlatego też celowym wydaje się przedstawienie charakterystyk i uwag dotyczących pracy kilku z będących w eksploatacji maszyn wyciągowych sterowanych automatycznie. Pod pojęciem automatyczny układ sterowania rozumiemy układ zapewniający samoczynne wykonanie jednego cyklu pracy, który trwa od chwili podania impulsu startowego do chwili zatrzymania się naczynia na poziomie wyładowczym. Impuls startowy może być podawany przez obsługę ewentualnie przez urządzenie załadowcze lub wyładowcze.
W większości układów pracujących w Polsce jest on podawany przez obsługę.

W wykonaniach poszczególnych układów automatycznego sterowania obserwujemy duże różnice. Pomijając systemy blokad i zabezpieczeń, różnice te polegają głównie na sposobie zadawania i kontroli prędkości oraz na rodzajach zastosowanych elementów wzmacniających. W zasadzie w układach automatycznego sterowania używane są wszystkie typy wzmacniaczy często w różnych kombinacjach tworząc najczęściej dwa lub trzy stopnie wzmocnienia. W starszych układach można wyróżnić wzmacniacz wstępny (amplidyna, wzmacniacz magnetyczny), który jednocześnie pełnił rolę jedynego węzła sumującego sygnały od sprzężeń zwrotnych i wzbudnicę pomocniczą. Obecnie układy automatycznego sterowania rozwiązuje się w ten sposób, że każdej wielkości regulowanej (np. prędkości, prądowi w obwodzie głównym, prądowi wzbudzenia prądnicy) przyporządkowuje się indywidualny regulator.

W niniejszym artykule ograniczono się do omówienia trzech maszyn wyciągowych z automatycznym sterowaniem będących charakterystycznymi przykładami w/w rozwiązań. Wspólną cechą tych układów jest to, że wszystkie są maszynami skipowymi z kołem pędnym i liną wyrównawczą.

2. Charakterystyka wybranych układów

Podstawę analizy stanowią pomiary i badania wielu maszyn wyciągowych z automatycznym sterowaniem wykonane przez Katedrę Napędu Elektrycznego.

Dla każdego z wybranych przykładów podano:

- uproszczony schemat sterowania automatycznego, w którym uwzględniono tylko obwody niezbędne do wyjaśnienia zasady działania, pomijając cały szereg blokad, obwodów sygnalizacji i zabezpieczeń typowych dla wszystkich układów napędowych maszyn wyciągowych,

- niektóre charakterystyczne parametry i dane maszyn,
- opis układu.

2.1. Układ automatycznego sterowania wg projektu Č KD

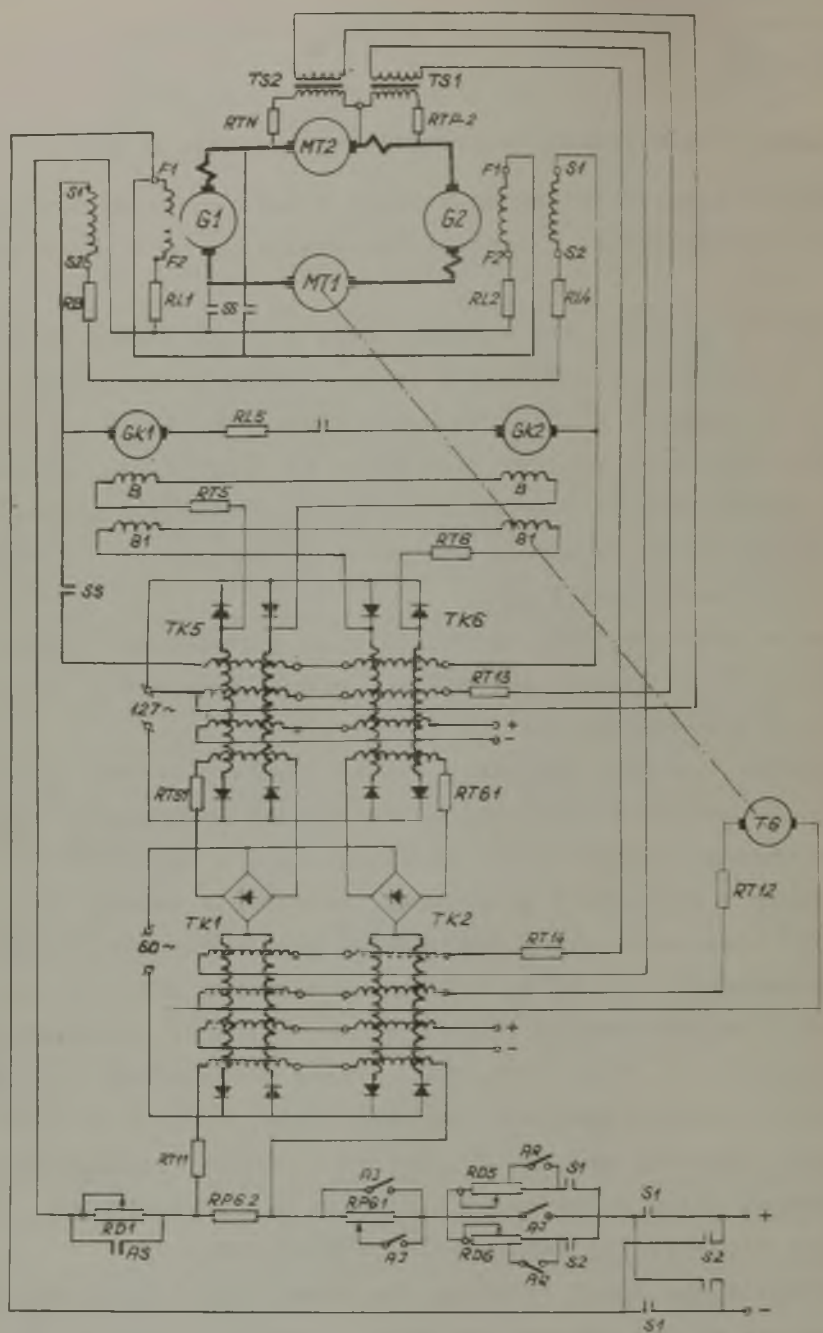
Omawiana maszyna wyciągowa została w całości zaprojektowana do pracy automatycznej i została zainstalowana na wieży szybowej.

Napęd główny stanowią dwa silniki prądu stałego o mocy 1800 kW każdy, sprzężone bezpośrednio z czterolinowym kołem pędnym. Silniki te są zasilane w układzie Punga z dwu prądnic (o mocy 2050 kW każdą) przy czym możliwa jest praca ze zmniejszoną wydajnością w wypadku awarii jednego silnika lub prądnicy. Prądnice G1, G2 są sterowane przez zmianę wielkości i polaryzacji prądu w uzwojeniach wzbudzenia F1-F2.

Maksymalna prędkość jazdy wynosi 16 m/s, a użyteczne obciążenie wynosi 15 T. Uproszczony schemat obwodu głównego i układu sterowania przedstawia rys. 1.

Prądnice sterujące posiadają dwa uzwojenia z których podstawowe F1, F2 zasilane są bezpośrednio z układu zadającego w skład którego wchodzi zestaw oporów przełączalnych w zależności od rodzaju jazdy i regulatory programowe (osobne dla każdego kierunku jazdy) sterowane kołami krzywkowymi głębokościomierza. Uzwojenia pomocnicze S1, S2 są zasilane z wzbudnic GK1, GK2, które z kolei są sterowane z dwustopniowej kaskady wzmacniaczy magnetycznych TK5, TK6 i TK1, TK2. Sygnał przechodzący przez wzmacniacze magnetyczne jest sygnałem błędu, który jest różnicą sygnału proporcjonalnego do prędkości zadanej (sprzężenie od podstawowego prądu wzbudzenia) i sygnału proporcjonalnego do prędkości rzeczywistej (sprzężenie prędkościowe).

W układzie regulacji istnieją dwa obwody stabilizacyjne. Jeden podający sygnał proporcjonalny do pochodnej prądu w obwo-



Rys. 1. Układ wg projektu CKD

dzie głównym na wejście pierwszego stopnia wzmacniaczy magnetycznych, drugi podający wielkość proporcjonalną do pochodnej napięcia silnika MT2 na wejście drugiego stopnia wzmacniaczy. Mają one za zadanie niedopuszczać do nagłych zmian i oscylacji w obwodzie głównym. Sterowanie automatyczne odbywa się w zamkniętym układzie regulacji. Jeśli układ kontrolny jest zamknięty impuls startowy powoduje załączenie stycznika kierunkowego. Po osiągnięciu przez silnik odpowiedniego momentu elektromagnetycznego (równego momentowi statycznemu) co zostaje stwierdzone przez przekaźnik prądowy w obwodzie głównym następuje odhamowanie maszyny. Prądnice są wzbudzane wg programu zależnego od regulatorów RD5 i RD6 napędzanych krzywkami w funkcji drogi.

Jednocześnie napięcie brane z opornika RPG2 proporcjonalne do sygnału zadającego jest podawane na pierwszy stopień kaskady wzmacniaczy magnetycznych i porównywane z wielkością proporcjonalną do prędkości obrotowej. Wynikający stąd błąd wzmacniany na drugim stopniu kaskady W-M steruje wzbudzeniem wzbudnic pomocniczych, które w zależności od znaku błędu dowzbudzają lub odwzbudzają prądnice główne. Ten układ regulacji działa tylko podczas rozruchu i hamowania, w czasie jazdy ustalonej prąd w uzwojeniach prądnic głównych S1, S2 praktycznie równa się zeru.

Dojazd przeprowadza ten sam regulator który powodował przyspieszenie, a z chwilą osiągnięcia poziomu magnetyczny łącznik krańcowy powoduje zahamowanie maszyny. W czasie postoju załączony jest układ samobójczy, który likwiduje magnetyzm szczątkowy zarówno w prądnicach głównych jak i pomocniczych.

2.2. Układ automatycznego sterowania wg projektu - Biura Projektów Gliwice

Projekt (z 1964 r.) maszyny wyciągowej 2400 kW w układzie Leonarda został opracowany w całości jako układ automatyczny.

Maszyna wyciągowa zainstalowana została na nadszybiu. Silnik główny 2400 kW, 650 V jest zasilany z dwu prądnic 1300 kW,325V. Prędkość ustalona wydobycia wynosi 15 m/s, a obciążenie użyteczne skipu 10T. Układ został wykonany całkowicie z elementów krajowych. Uproszczony schemat automatycznego sterowania przedstawia rys. 2.

Uzwojenia wzbudzenia prądnic połączone szeregowo są zasilane z amplidyny 6M. Istnieje możliwość pracy silnika przy zasilaniu tylko z jednej prądnicy, wtedy w miejsce jednego uzwojenia włączony jest opór (nie pokazany na rys. 2).

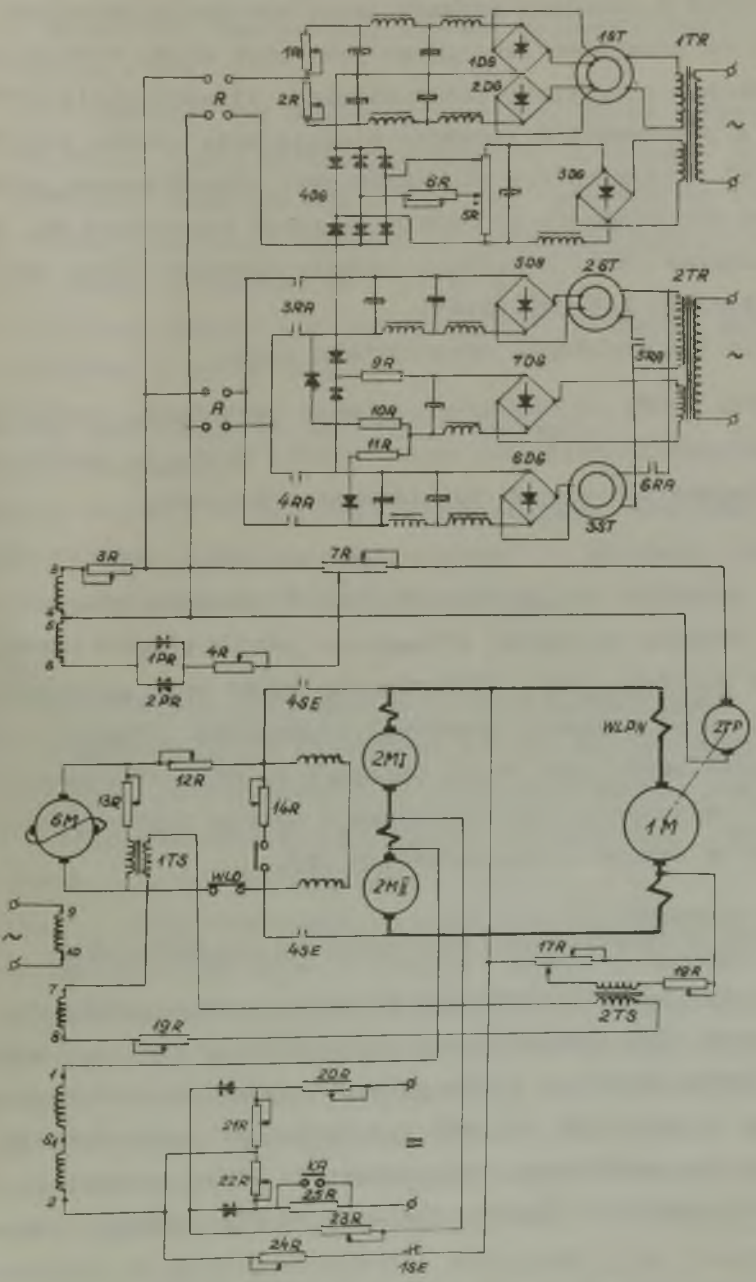
Układ posiada:

- dwa niezależne układy podawania napięcia sterującego, osobno dla pracy ręcznej "R" i sterowania automatycznego "A",
- obwód zadający w układzie różnicowym
- obwód wstępnego ograniczenia prądu
- obwód ujemnego sprzężenia prądowego z progiem zadziałania
- obwód sprzężenia stabilizacyjnego.

Zadawanie maszyny wykonane jest w układzie różnicowym.Uzwojenie 3-4 amplidyny zasilane jest napięciem wynikającym z galwanicznego porównania napięcia tachoprądnicy 2TP (proporcjonalnego do prędkości rzeczywistej) i napięcia proprocjonalnego do żądanej prędkości ze sterownika indukcyjnego. Odpowiedni sterownik dla danego kierunku jazdy zostaje włączony stycznikiem kierunkowym 3 RA lub 4 RA. Dla uzyskania prędkości wlecznych służy obwód złożony z dodatkowego uzwojenia transformatora 2TR prostownika 7 DG i układu oporów 9R, 10R, 11R.

Przy sterowaniu ręcznym napięcie proporcjonalne do żądanej prędkości uzyskuje się z układu mostkowego sterownika 1ST zapewniającego zmianę znaku zależnie od kierunku wychylenia dźwigni.

Obwód wstępnego ograniczenia prądowego (uzwojenia 5-6 amplidyny) zasilany jest z układu różnicowego i ma za zadanie ogra-



Rys. 2. Układ wg projektu BPG

niczyć prąd w obwodzie głównym przez wywołanie przepływu przeciwnego do przepływu zadającego przy zbyt dużej różnicy napięcia zadanego i napięcia tachoprądnicy. Element nieliniowy zbudowany z prostowników zapewnia niedziałanie układu przy różnicy napięć mniejszej niż 5%. Układ jest stabilizowany przy pomocy dwu transformatorów różniczkujących włączonych na napięcie amplidyny (1TS) i napięcie obwodu głównego (2Ts) zasilających uzwojenie 7-8 amplidyny.

Uzwojenie 1-2 amplidyny wykorzystane jest:

- w czasie jazdy, w obwodzie ujemnego sprzężenia prądowego z progiem zadziałania przy czym wartość napięcia progowego jest zmniejszona dla okresu wychodzenia z krzywek,
- w czasie postoju, w obwodzie ujemnego sprzężenia napięciowego do gaszenia napięć szczątkowych w obwodzie głównym.

Ponadto maszyna wyciągowa wyposażona jest w układ samoczynnej korekcji poślizgu liny, który działa tylko przy zatrzymanej maszynie i układ kontroli prędkości dojazdowej. Prędkość dojazdowa kontrolowana jest w dwu punktach na drodze hamowania przez łączniki magnetyczne zainstalowane w szybie i dwa przekaźniki włączone na napięcie tachoprądnicy 2TP.

2.3. Układ automatycznego sterowania wg projektu ASEA.

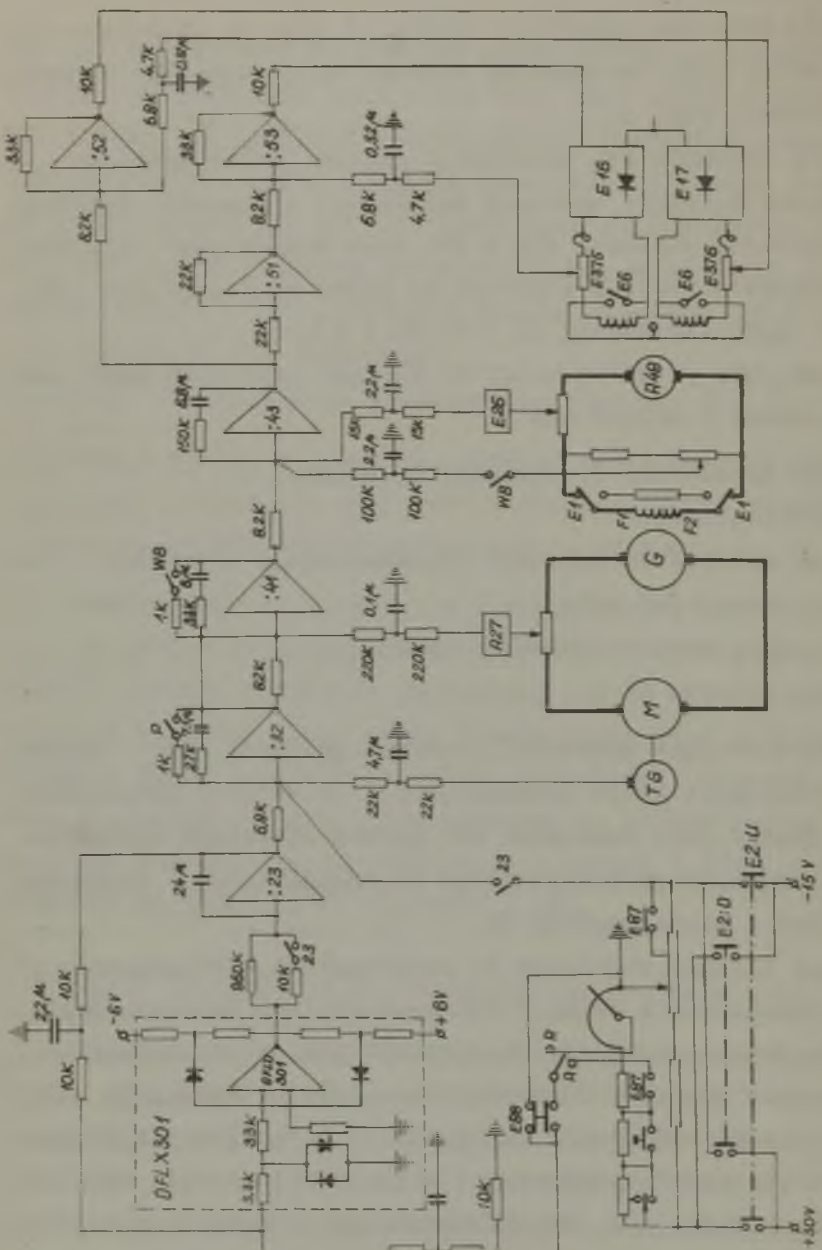
Układ ten został dobudowany do istniejącego układu firmy Skoda, przy czym zachowana została możliwość ręcznego sterowania w starym układzie. Obwód główny układu Leonarda składa się z silnika o mocy 2460 kW, 600 V i prądnicy o mocy 2500 kW,600V. Prądnica jest sterowana z wzbudnicy 48A która posiada dwa uzwojenia wzbudzenia - każde czynne tylko dla jednego kierunku jazdy.

Prędkość ustalona wydobycia wynosi 10 m/s, a użyteczne obciążenie skipu 10T. Uproszczony schemat automatycznego sterowania przedstawia rys. 3.
Można w nim wyróżnic dwa zasadnicze człony: układ zadający i układ regulacji. Układ zadający składa się z zespołu styczników i oporników, elementu QFL x 301 oraz wzmacniacza: 23. Formuje on sygnał sterujący podawany na układ regulacji dla obu kierunków jazdy (styczniki E2 : U, E2 : D),
Sygnał sterujący proporcjonalny do żądanej prędkości jazdy jest 5-cio odcinkowy i składa się z:

- liniowego narastania do wartości ustalonej,
- wartości ustalonej,
- liniowego malenia do wartości odpowiadającej prędkości dojazdowej równej 2÷3 m/s,
- wartości ustalonej prędkości dojazdowej,
- liniowego malenia do 0.

Sygnał odpowiadający prędkości wlecznej podawany jest wprost na układ regulacji przez przekaźnik 23. Na wejściu wzmacniacza: 23, pracującego jako regulator PI, sygnał sterujący porównywany jest z sygnałem proporcjonalnym do rzeczywistej prędkości jazdy branym z tachoprądnicy TG.

Następny z kolei regulator PI zbudowany na wzmacniaczu: 41 służy do ograniczenia prądu w obwodzie głównym Leonarda. Napięcie proporcjonalne do prądu otrzymywane jest z przetwornika A27, który wzmacnia sygnał z bocznika i oddziela galwanicznie obwód główny do układu regulacji. Regulator PI (wzmacniacz 43) ogranicza prąd wzbudzenia generatora. Element E26 spełnia taką samą rolę jak element A27. Sygnał wychodzący z wzmacniacza:43 zostaje porównany na wejściu wzmacniaczy: 52:53 z sygnałami proporcjonalnymi do prądów wzbudzenia wzbudnicy i po wzmocnieniu podany na wzmacniacze tyrystorowe E16, E17 z których każdy pra-



Rys. 3. Układ wg projektu ASEA

cuje dla jednego kierunku jazdy i jest obciążony odpowiednim uzwojeniem wzbudzenia wzbudnicy A48. To sprzężenie zwrotne znacznie zmniejsza stałą czasową wzbudnicy. W czasie postoju sygnał na wyjściu regulatora: 32 jest równy 0 dzięki zadziałaniu przekaźnika P, a napięcie remanentu prądnicy gaszone jest ujemnym sprzężeniem prądowym. W wypadku hamowania awaryjnego działa przekaźnik WB podając ujemne napięcie z wzbudnicy A48 na regulator: 43 oraz zmniejszając napięcie sterujące do zera na regulatorze: 41.

Należy dodać, że wszystkie regulatory typu PI, P zbudowane są na tranzystorowym wzmacniaczu prądu stałego QFL D155 co ułatwia konserwację i ogranicza rezerwę do 1-2 sztuk wzmacniaczy. Ponadto maszyna wyciągowa posiada jeszcze:

- samoczynny układ korekcji poślizgu liny,
- kontrolę prędkości jazdy maszyny w zależności od położenia skipu w szybie,
- układ kontroli prędkości dojazdowej.

3. Porównania omawianych układów automatycznego sterowania

Omówione układy automatycznego sterowania maszyn wyciągowych pracują na szybach o różnej głębokości stąd też nie można porównywać czasów cyklu pracy, ilości wydobytego urobku itp., które to wielkości najlepiej charakteryzują układ napędowy. Można natomiast porównać układy regulacji automatycznej, pewne wielkości charakteryzujące stany dynamiczne jak - przyspieszenie, wielkość przeregulowania czy wpływ obciążenia na prędkość jazdy.

Dwa pierwsze układy automatycznego sterowania rozwiązane w różny sposób posiadają wiele wspólnych cech. Posiadają jeden sumator będący równocześnie wzmacniaczem, gdzie przychodzą sygnały od układu zadającego sprzężeń zwrotnych i stabilizują-

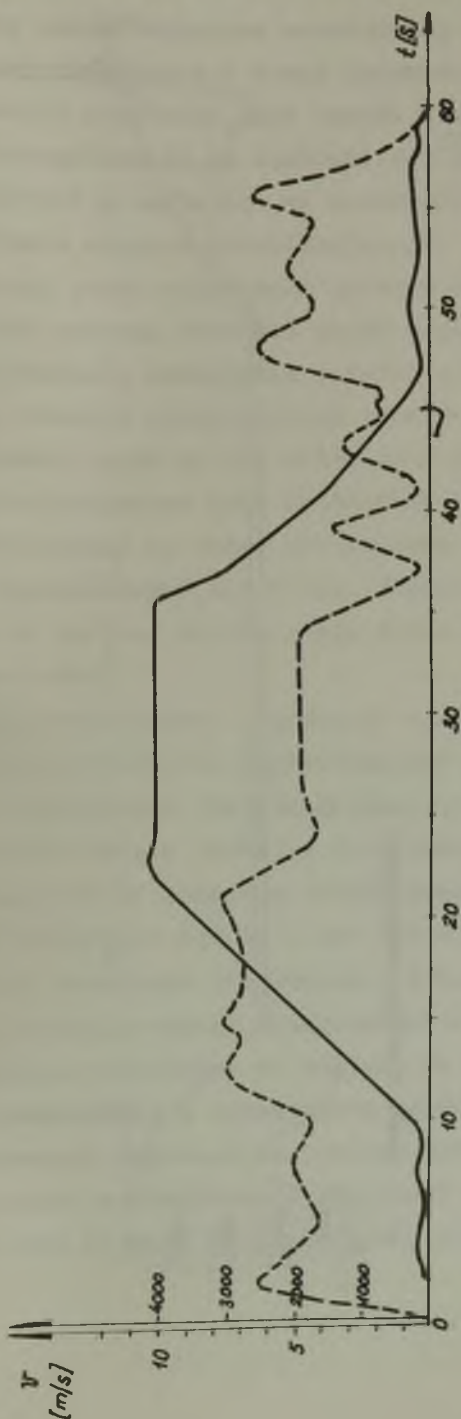
cych. Sumatorem tym jest układ wzmacniaczy TK1, TK2 w układzie ĈKD i amplidyna w układzie BPG. Użyte elementy wzmacniające są elementami inercyjnymi 1 i 2 rzędu. Układy takie mimo stosowania silnych sprzężeń zwrotnych zawsze będą posiadały statyczną charakterystykę elementu wykonawczego - (silnika). Odznaczają się one dużym czasem regulacji - zależnym od ilości stopni wzmocnienia. W obu układach użyto jako elementów stabilizujących transformatorków różniczkujących. Układ BPG jest jednak układem nowoczesniejszym dzięki zastosowaniu wzmacniacza o dużym wzmocnieniu i b. silnego sprzężenia od prędkości obrotowej k=9. O jakości układu regulacji świadczy między innymi nachylenie charakterystyki statycznej silnika określone jako $(\frac{\Delta n}{n})_{In}$ które zostało zmierzone i wynosi

6,66% dla układu ĈKD
i 2,89% dla układu BPG

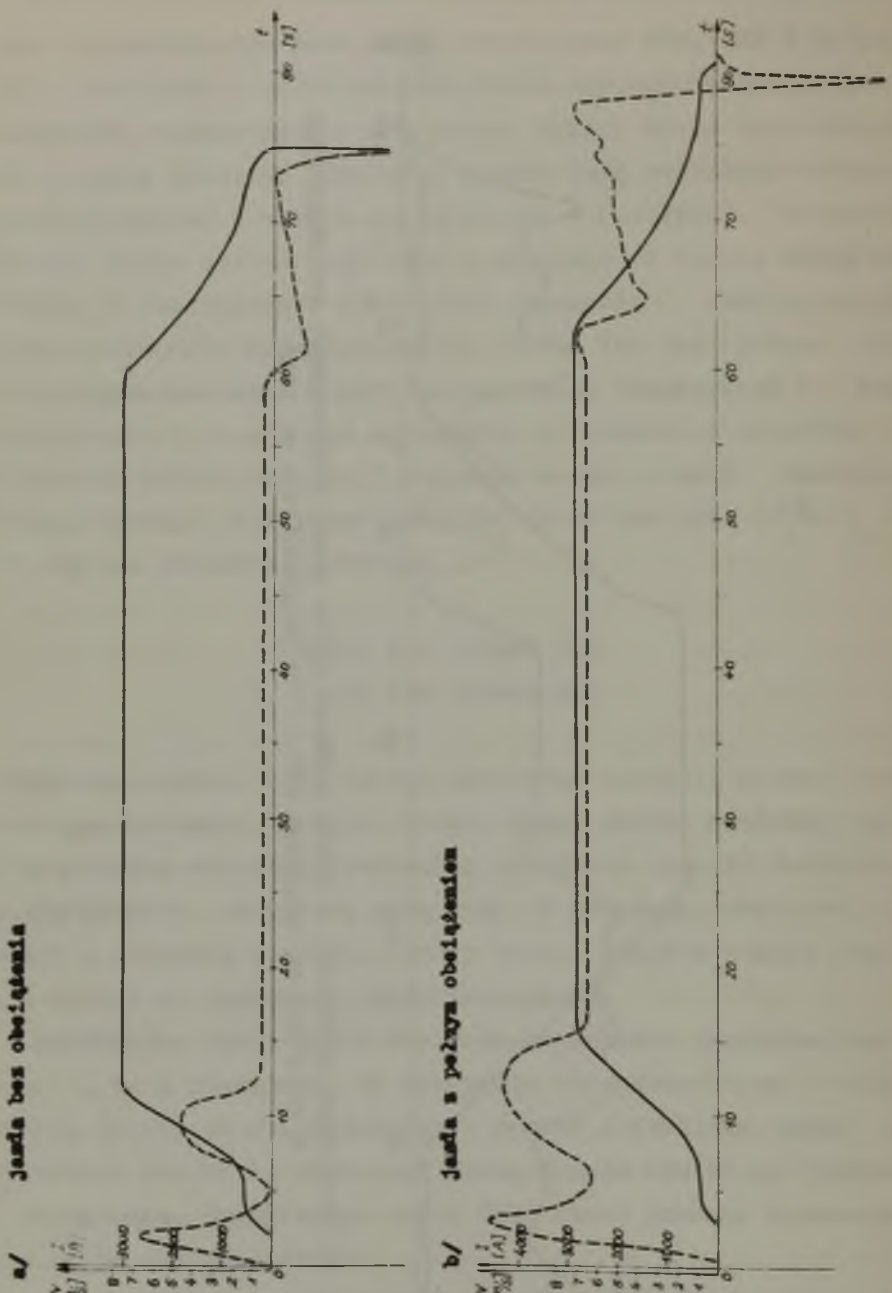
Układ aut. regul. ASEA został zbudowany inaczej. Każdej wielkości regulowanej (ściślej każdej dużej stałej czasowej) przyporządkowany został indywidualny regulator typu PI. Podstawowymi sprzężeniami układu są sprzężenia od prędkości obrotowej i od prądu w obwodzie głównym. Dzięki takiej budowie układu regulacji silnik ma charakterystykę astatyczną.

Porównując cykle pracy dla różnych układów przedstawione na rys. 4, 5, 6 zauważamy, że tam gdzie charakterystyka silnika silnie zależy od obciążenia jest prawie niemożliwe takie zestrojenie układu by pracował automatycznie dla biegu jałowego i obciążenia. Przykładem, układ ĈKD, który pracuje automatycznie tylko dla obciążenia.

W układzie BPG charakterystyka silnika jest sztywniejsza stąd też układ pracuje automatycznie przy biegu jałowym i obciążeniu lecz wartości przyspieszeń i obciążeń różnią się między



Rys. 4. Przebiegi prędkości i prądu podczas cyklu pracy sterowanego automatycznie w układzie wg projektu CKD ——— prędkość - - - prąd



Rys. 5. Przebiegi prędkości i prądu podczas cyklów pracy sterowanych automatycznie w układzie wg projektu BPG ——— prędkość - - - - prąd

sobą. Przy charakterystyce astatycznej układ pracuje prawie jednakowo przy obciążeniu i biegu jałowym.

Narastanie prędkości jest prawie linowe dla wszystkich układów a przeregulowania są niewielkie i nie przekraczają 4%. W układzie BPG w ogóle nie ma przeregulowań co świadczy o dobrym dobraniu sprężeń stabilizujących.

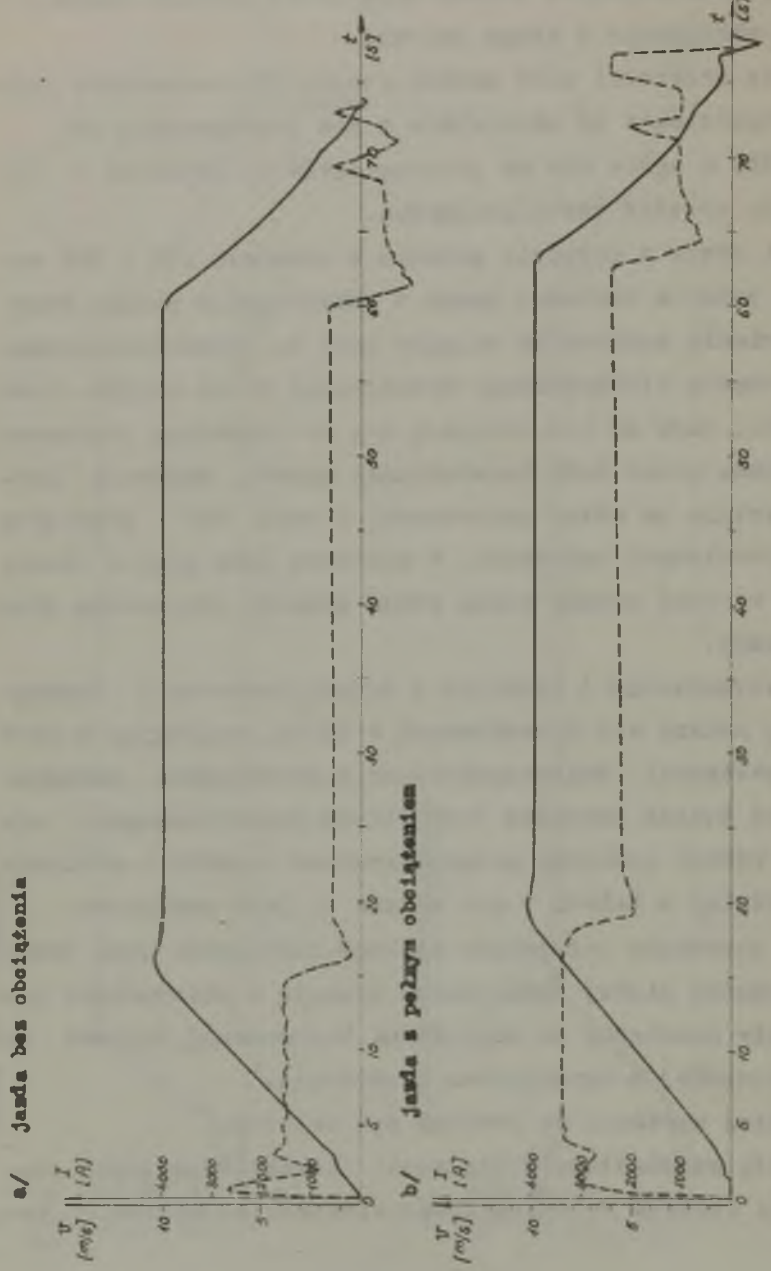
Przebiegi prądu w obwodzie głównym w układach ČKD i BPG wykazują duże wahania wartości prądu w czasie cyklu pracy. Przy stałym strumieniu wzbudzenia silnika jest to równocześnie obraz przebiegu momentu elektrycznego rozwijanego przez silnik. Duże udary momentu, mimo że nie odbijają się na przebiegu prędkości jazdy stłumione przez duże bezwładności układu, wpływają bardzo niekorzystnie na układ mechaniczny i mogą być przyczyną pęknięć zmęczeniowych materiału. W układzie ASEA prąd w czasie rozruchu ma wartość prawie stałą równą prądowi obciążenia plus prąd dynamiczny.

Zmiany przyspieszeń i opóźnień w czasie rozruchu i hamowania powodują zmiany sił dynamicznych w linie, wpływając na skrócenie jej żywotności. Najkorzystniejszym przebiegiem narastania prędkości będzie przebieg przy stałym przyspieszeniu, nie powinno być różnic pomiędzy przyspieszeniem średnim i maksymalnym a jak widzimy w tabeli 1 nie zawsze to jest spełnione.

W czasie hamowania utrzymanie stałego opóźnienia jest trudniejsze i różnice między opóźnieniem średnim i maksymalnym będą występowały chociażby ze względu na konieczność dojazdu do stacji wyładunkowej z ograniczoną prędkością.

Tym niemniej wartości te powinny być zbliżone.

Zestawienie szczegółowych wielkości charakteryzujących stany dynamiczne układów automatycznego sterowania zebrano w tabeli 1.



Rys. 6. Przebiegi prędkości i prądu podczas cyklów pracy sterowanych automatycznie w układzie wg projektu ASEA ——— prędkość - - - - prąd

Tablica 1

Porównanie pomierzonych wielkości charakteryzujących omawiane układy automatycznego sterowania

Wielkość / Układ	ČKD		BPG		ASEA	
Głębokość wydobycia	292 m		479 m		692 m	
Ciężar użyteczny	15 T		10 T		10 T	
Moc silnika (silników)	2 x 1800 kW		2400 kW		2460 kW	
Prąd znam. silnika I_n	2700 A		4000 A		4500 A	
Char.stat. $(\frac{\Delta n}{n})_{I_N}$ w [%]	6,66		2,89		0	
	Bieg. jał.	Obc. znam.	Bieg. jał.	Obc. znam.	Bieg. jał.	Obc. znam.
Prędkość jazdy ustalona V_{ust} [m/s]		10	7,5	7,1	10	10
Przeregulowania prędkości $\frac{V_{max} - V_{ust}}{V_{ust}}$ w [%]		2,1	0	0	4	3,7
Udary prądu $\frac{I_{max}}{I_{ust}}$		1,61	14	1,78	4	1,39
Czas rozruchu w [s]		22	15*	19*	15	19
Czas hamowania w [s]		22	19*	19*	14	14
Max. przyśp. w [m/s]		0,755	1,17	1,13	0,72	0,633
Średnie przyśp. w [m/s]		0,755	0,665	0,6	0,72	0,633
Opóźnienie max. w [m/s]		1,6	0,65	0,63	1,07	1,01
Średnie opóźnienie w [m/s]		0,86	0,84	0,4	0,8	0,8

Uwaga: Wielkości oznaczone gwiazdką przeliczone dla prędkości ustalonej 10 m/s.

4. Wnioski

W niniejszym artykule w sposób ogólny omówiono i porównano tylko niektóre właściwości i parametry maszyn wyciągowych z automatycznym sterowaniem, całość zagadnienia nie mieści się w ramach tego artykułu. Przewaga układów automatycznego sterowania nad sterowaniem ręcznym jest oczywista zarówno z punktu widzenia ekonomiki jak i bezpieczeństwa pracy. Przy sterowaniu automatycznym powtarzalność cyklu jest bardziej regularna, przerwy krótsze co zwiększa przepustowość szybu.
Prawie stałe przyspieszenia przy rozruchu nie powodują dużych naprężeń dynamicznych w układzie mechanicznym maszyn wyciągowych co zwiększa jego żywotność. Uniezależniamy się również od stanu psychicznego maszynisty u którego po wielogodzinnej pracy mogą wystąpić objawy znużenia, zmniejszenia uwagi itp.

Z omawianych układów automatycznego sterowania najlepiej spełnia swoje zadanie układ wg projektu ASEA. Przyspieszenie w czasie rozruchu jest stałe, dzięki astatycznej charakterystyce regulacji, jazda ustalona odbywa się zawsze z tą samą prędkością niezależną od obciążenia, a zastosowanie elementów opartych na półprzewodnikach zapewnia dużą pewność działania i zmniejsza pracochłonność konserwacji.

W żadnym z układów automatycznego sterowania pracującym w polskim górnictwie nie stosuje się samoczynnego rozpoczęcia zwalniania w zależności od obciążenia. Przy stałym momencie hamującym im większy ciężar ciągniemy do góry tym krótsza może być droga hamowania, bo dopuszczalne opóźnienie nie stwarzające możliwości poślizgu liny jest większe.

Ponieważ w urządzeniach wyciągowych obciążenie zmienia się w szerokich granicach, uzależnienie punktu rozpoczęcia hamowania od obciążenia dałoby w efekcie zwiększenie wydajności maszyny wyciągowej.

Należy jeszcze dodać, że aby móc korzystać z efektów automatyzacji w postaci zwiększonego wydobycia maszyna wyciągowa musi być w pełni wykorzystana (nie może być przerw i postojów w wydobyciu), a układ elektryczny automatycznego sterowania powinien być optymalnie dostrojony - co nie zawsze jest spełnione w praktyce.

АВТОМАТИЗИРОВАНЫЕ ШАХТНЫЕ ПОДЪЕМНЫЕ МАШИНЫ
В СИСТЕМЕ ЛЕОНАРДА

Р е з ю м е

В труде рассматрены подъемные машины с автоматическим управлением, принимая в основу 3 различных решения, избранные с находящихся в эксплуатации в польской угольной промышленности. Обсуждены конструкция и принцип действия, сопоставлены статические характеристики и свойства в динамических состояниях. Приведён ряд практических выводов.

MINE WINDERS WITH AUTOMATIC CONTROL IN
WARD-LEONARD'S SYSTEM

S u m m a r y

Authors consider three different types of mine winders with automatic control system chosen from among used now in Polish coal mine industry. There are given discription of control systems,static charakteristics and properties in dynamic proceses. Finally, there are compared these three systems and short conclusions drawn.