ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: ELEKTRYKA z. 84 Nr kol. 744

Andrzej WOLSKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

MOŻLIWOŚCI AUTOMATYZACJI GOSPODARKI ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ W SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ KOPALŃ WĘGLA KAMIENNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono techniczne możliwości realizacji kompleksowej kompensacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej kopalni. Podano warunki, które należy wziąć pod uwagę przy analizie obciążenia sieci kopalnianej oraz sposób opracowania algorytmu sterowania układami kompensacyjnymi. W zakończeniu podano przykładowy schemat blokowy układu sterowania.

1. Wstęp

Zapotrzebowanie na moc bierną odbiorców przemysłowych jest większe niż mogą pokryć, w racjonalny sposób, generatory elektrowni zawodowych. W związku z tym zachodzi potrzeba kompensacji mocy biernej, która polega na jej wytwarzaniu bezpośrednio w miejscu zapotrzebowania. Moc bierna obciąża elementy sieci, ogranicza przepustowość urządzeń energetycznych, wywołuje spadki napięć i powoduje występowanie strat mocy czynnej. Straty mocy są sumą dwóch składników:

- strat mocy czynnej wywołanej przepływem mocy czynnej:

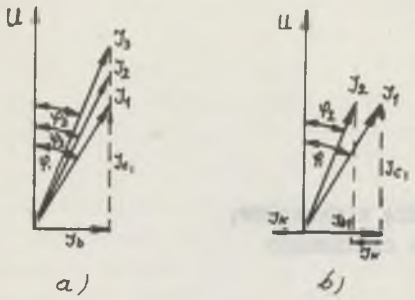
$$\Delta P_c = \frac{P^2}{U^2} R$$

- strat mocy czynnej wywołanej przepływem mocy biernej:

$$\Delta P_q = \frac{Q^2}{U^2} R$$

Właśnie ten drugi składnik jest głównym przedmiotem gospodarki mocą bierną i energią bierną. W dawniejszej literaturze z zakresu gospodarki mocą bierną mówiono o poprawie współczynnika mocy, a nie o gospodarce mocą bierną.

Z punktu widzenia energetycznego poprawa współczynnika mocy może nie mieć nic wspólnego z gospodarką mocą bierną. Jak widać z rys. 1a, współczynnik mocy powiększy się przy wzroście obciążenia mocą czynną, przy niezmienionej mocy biernej. Poprawę współczynnika mocy można osiągnąć przez



Rys. 1. Zależność współczynnika mocy i obciążenia a) i mocy biernej pojemnościowej b)

zmniejszenie poboru mocy biernej (rys. 1b), czyli przez zastosowanie urządzeń kompensujących.

Zmiana wartości przesyłanej mocy biernej prowadzi do zmiany wartości strat mocy czynnej ΔP_q. W celu liczbowego ujęcia tych zmian wprowadzono wielkość:

$$k_e = \frac{d(\Delta P_g)}{dQ} = \frac{2Q}{U^2} R$$

zwaną energetycznym równoważnikiem mocy biernej.

Z drugiej strony wytwarzanie mocy biernej odbywa się zawsze kosztem mocy czynnej.

Pobór mocy czynnej, potrzebnej do wytworzenia jednostki mocy biernej, nazywamy jednostkowym zużyciem mocy urządzeń kompensacyjnych i oznaczamy k_k. Kompensacja mocy biernej jest energetycznie uzasadniona tylko wtedy, kiedy w jej wyniku ogólne straty mocy czynnej zmaleją. Zainstalowanie urządzenia kompensacyjnego o mocy ΔQ_k powoduje pobór z sieci dodatkowej mocy czynnej $\Delta P_k = \Delta Q_k k_k$, a jednocześnie obniżenie strat mocy czynnej z powodu zmniejszenia poboru z sieci mocy biernej o $\Delta Q_k k_e$. Kompensacja jest celowa, gdy:

$$\Delta Q_k k_e > \Delta Q_k k_k$$

czyli gdy:

$$k_e - k_k > 0$$

2. Koszty kompensacji

Czy kompensacja będzie ekonomicznie uzasadniona, zależy w dużym stopniu od rodzaju urządzeń kompensacyjnych. Jednostkowe zużycie mocy czynnej k_k w urządzeniach kompensacyjnych zmienia się w znacznych granicach, a nie zawsze jest możliwe zastosowanie urządzenia najekonomiczniejszego, czyli o najmniejszym k_k. Poniżej opisano trzy najczęściej stosowane urządzenia kompensacyjne.

Kompensacja elektromaszynowa przy użyciu kompensatorów wirujących lub przy wykorzystaniu niedociążonych silników synchronicznych. Maszyny synchroniczne do tego celu powinny posiadać tyrystorowe wzbudnice zapewniające współczynnik forsowania prądu wzbudzenia rzędu $(4 - 8)I_N$, co zapewnia czas reakcji układu 0,2 - 0,5 s. Pozwala to na wykorzystanie ich do kom-

pensacji nadążnej lub w układach kompensacji sterowanej automatycznie. Straty mocy czynnej wynoszą 1 - 1,2% przy biegu jałowym i 2 - 5% przy obciążeniu, czyli $k_k = (0,02 - 0,05)\ \frac{kW}{kvar}$.

Silniki synchroniczne wytwarzają moc bierną pojemnościową, którą wysyłają bezpośrednio do sieci 6 kV, natomiast sterowanie mocą odbywa się po stronie niskiego napięcia. Ten sposób wytwarzania mocy biernej jest szczególnie korzystny w sieciach kopalnianych, w których wiele wentylatorów, sprężarek lub przetwornic jest napędzanych silnikami synchronicznymi.

Baterie kondensatorów stosowane do kompensacji są sekcjonowane i łączone z siecią łącznikami tyrystorowymi. Bateria jest zwykle łączona w trójkąt, a łączniki znajdują się w każdej gałęzi trójkąta, dzięki czemu przy obciążeniu niesymetrycznym można prowadzić niezależną kompensację w każdej fazie. Straty mocy czynnej wynoszą 0,13% przy biegu jałowym i około 0,8 - 1,2% przy obciążeniu. Wtedy można przyjąć, że współczynnik $k_k = 0,0012\ \frac{kW}{kvar}$. Układy takie budowane są na napięcie 6kV lub na napięcie niższe, wówczas bateria jest łączona przez dodatkowy transformator.

Układy kompensacji pośredniej, w której bateria kondensatorów jest włączona na stałe, a chwilowo zbędną moc bierną zużywa się w równoległe włączonych odbiornikach. Odbiornikiem jest przeważnie dławik, którego prąd jest regulowany przez układ tyrystorowy. Sprawność układów kompensacji pośredniej przy pełnym obciążeniu jest duża, równa sprawności baterii kondensatorów, a straty mocy czynnej wynoszą około 1,0%, natomiast przy biegu jałowym sprawność jest niższa, a straty kompensacji wynoszą od 1,0 - - 1,8%. Współczynnik k_k będzie się więc zmieniał od $(0,01 - 0,018)\ \frac{kW}{kvar}$.

3. Analiza obciążenia sieci elektroenergetycznej kopalni

Pomiar energii czynnej i biernej pobieranej z sieci energetyki odbywa się przy użyciu aparatury kontrolno-pomiarowej zainstalowanej zwykle w rozdzielni głównej po stronie 6 kV. Energia czynna mierzona jest w układzie sumującym za pomocą liczników energii czynnej, zainstalowanych na odpływach z transformatorów 110/6 kV. Energia bierna indukcyjna i pojemnościowa mierzona jest oddzielnie za pomocą liczników energii biernej, zainstalowanych również na odpływach transformatorów. Rozliczenie energii czynnej i biernej odbywa się w okresach miesięcznych. Za energię czynną opłaty obliczane są wg wskazań licznika, a opłaty za energię bierną indukcyjną obliczane są oddzielnie dla każdej taryfy wg wzoru:

$$C_t = (A_{qt} - A_{ct}\ tg\varphi_{kt})K$$

gdzie:

C_t - wartość dopłaty za energię bierną indukcyjną pobraną w określonej taryfie,

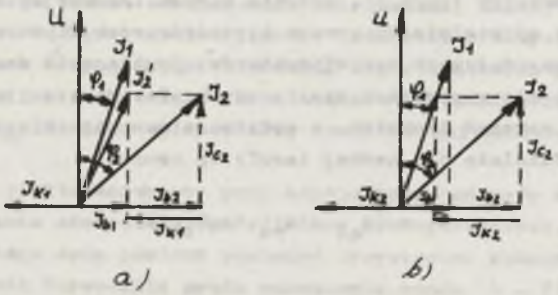
A_{qt} - sumaryczna energia bierna pobrana przez kopalnię,
A_{ot} - sumaryczna energia czynna dla określonej taryfy,
K - cena jednej kvar h.

Tangens kąta mocy został określony dla kopalni przez ZEOPd i przykładowo wynosi:

strefa dzienna 0,48
strefa szczytowa 0,60
strefa nocna 0,60

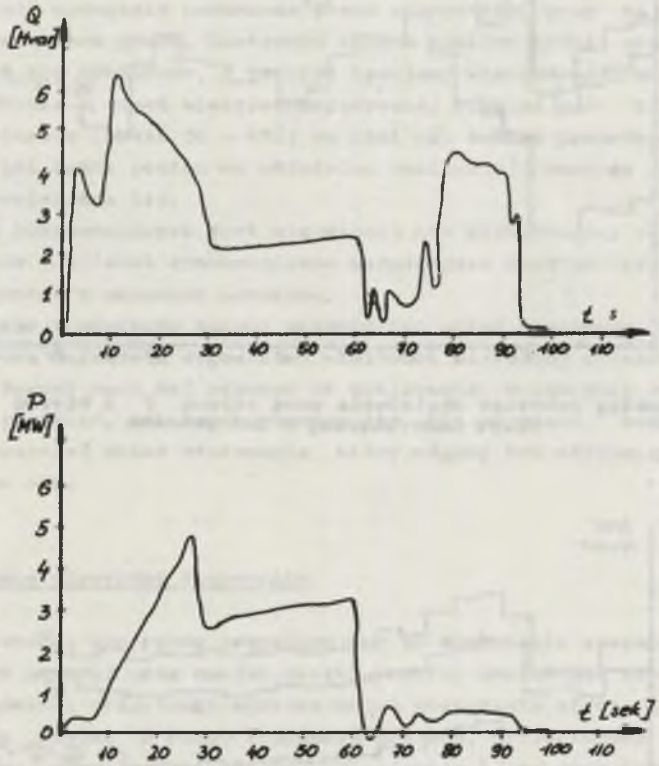
W przypadku gdy $A_{qt} > A_{ot} tg\,\varphi_{kt}$, kopalnia ponosi dodatkowe opłaty. Opłaty za energię bierną pojemnościową obliczane są oddzielnie na podstawie wskazań jednotaryfowych liczników zainstalowanych na odpływach z transformatorów.

Jak z powyższych rozważań wynika, podstawą właściwej gospodarki mocą bierną jest utrzymanie poboru mocy biernej na takim poziomie, aby zależność $A_{qt} = A_{ot} tg\,\varphi_{kt}$ była spełniona dla każdej strefy obciążenia. Wymaga to nie tylko kontroli zapotrzebowania na moc bierną i w przypadku wzrostu wytwarzania jej w urządzeniach kompensacyjnych w takiej ilości, by pobór mocy biernej z sieci się nie zmienił, lecz także kontroli kąta mocy i takiej regulacji wytwarzaniem mocy biernej, by kąt ten był równy zadanemu. Można to prześledzić na rys. 2a. Przy zmianie prądu obciążenia z wartości I_1 na I_2 kąt mocy zwiększa się z wartości φ_1 do wartości φ_2. Kompensując tylko różnicę składowych indukcyjnych prądów $I_k = I_{2b} - I_{1b}$, przy nowej wartości składowej czynnej prądu I_{2c}, kąt mocy osiągnie wartość $\varphi_3 > \varphi_1$. Chcąc osiągnąć niezmieniony kąt mocy φ_1, składowa pojemnościowa prądu I_{2k} musi być większa (rys. 2b). Wynikają stąd wnioski dla automatycznego układu gospodarki energią elektryczną. Regulację należy prowadzić wg dwu parametrów: mocy biernej i kąta mocy. Obwód regulacji mocy biernej wstępnie kompensuje zwiększone zapotrzebowanie, a obwód regulacji kąta mocy dokładnie dostraja układ do zadanych wartości kąta.



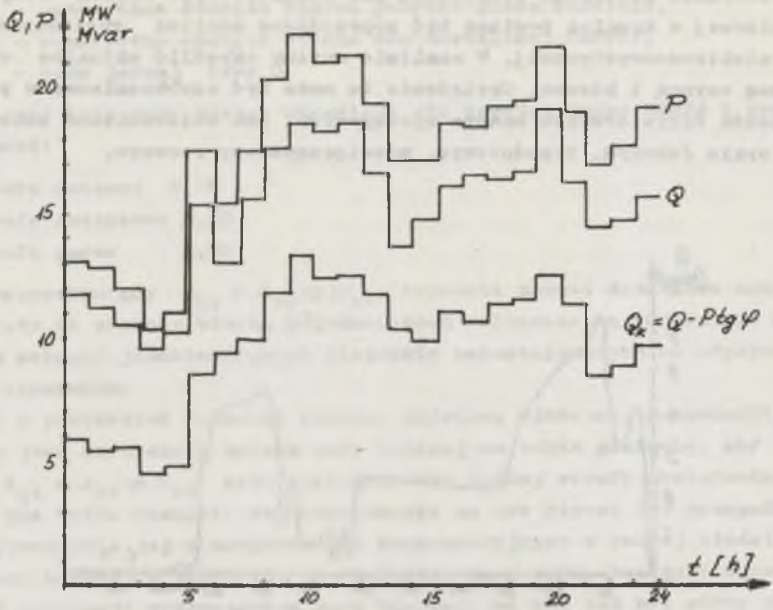
Rys. 2. Zmiana kąta mocy przy kompensacji w funkcji mocy biernej (a) oraz przy kompensacji w funkcji współczynnika mocy (b)

Opracowanie algorytmu sterowania dla kompleksowego układu kompensacji mocy biernej w kopalni powinno być poprzedzone analizą obciążenia całej sieci elektroenergetycznej. W analizie musimy określić aktualne obciążenie mocą czynną i bierną. Obciążenie to może być szybkozmienne w przypadku napędów tyrystorowych maszyn wyciągowych, lub wolnozmienne zmieniające się w cyklu dobowym, tygodniowym, miesięcznym czy rocznym.

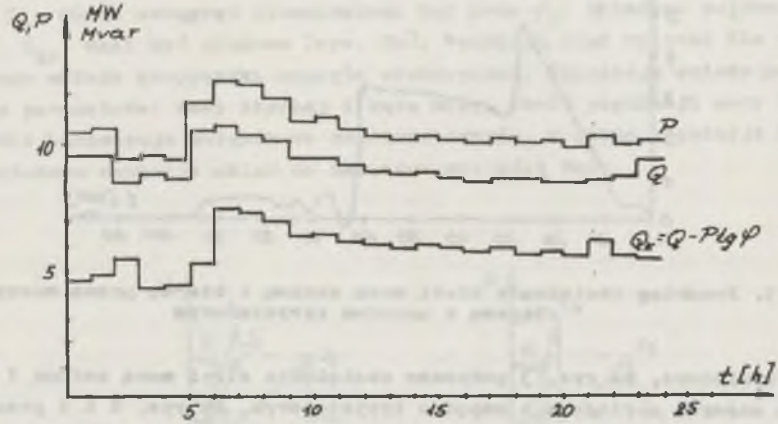


Rys. 3. Przebieg obciążenia sieci mocą czynną i bierną przez maszynę wyciągową z napędem tyrystorowym

Przykładowo, na rys. 3 pokazano obciążenie sieci mocą czynną i bierną przez maszynę wyciągową z napędem tyrystorowym. Na rys. 4 i 5 przedstawiono dobowe obciążenie rozdzielni głównej mocą czynną i bierną oraz deficyt mocy biernej w dni robocze i niedziele. Musimy również brać pod uwagę przewidywane obciążenie w przyszłości w przypadku rozbudowy sieci kopalnianej, budowy nowych poziomów, instalowania nowych maszyn wyciągowych itp. Znając aktualne i przewidywane obciążenie sieci należy określić, w których miejscach sieć jest niedokompensowana, a w których przekompensowana, skre-



Rys. 4. Przebieg dobowego obciążenia mocą czynną P i bierną Q oraz deficyt mocy biernej w dni robocze



Rys. 5. Przebieg dobowego obciążenia mocą czynną P i bierną Q oraz deficyt mocy biernej w niedzielę

ślić miejsca, w których powinny być zainstalowane nowe urządzenia kompensujące, biorąc pod uwagę, że moc bierna powinna być wytwarzana możliwie blisko jej odbiornika. Należy przeanalizować możliwość wykorzystania do

kompensacji istniejących niedociążonych silników synchronicznych, lub - o ile to jest możliwe ze względów ekonomicznych - zmianę ich na jednostki większe, które mogłyby pracować również jako kompensatory. Przewidując instalację nowych urządzeń kompensacyjnych powinniśmy wybierać te, które wytwarzają moc bierną najtaniej, czyli o najmniejszym współczynniku k_k. Mając dokładnie określone zapotrzebowanie na energię, zlokalizowane miejsce zainstalowania nowych urządzeń kompensacyjnych i określoną rezerwę mocy, w urządzeniach istniejących, trzeba wstępnie przeliczyć, czy jesteśmy w stanie spełnić wymagania narzucone przez energetykę, przy najniekorzystniejszych warunkach pracy. Następnym etapem analizy będzie ustalenie punktów w sieci lub odbiorów, w których będziemy kontrolowali moc bierną i kąt mocy. Zwykle z sieci elektroenergetycznej kopalni jest kilkadziesiąt ważnych odbiorów (około 30 - 40); są nimi np. zakład przeróbczy, dół kopalni (na ogół każdy poziom ma oddzielne zasilanie), maszyny wyciągowe, sprężarki powietrzne itp.

Urządzeń kompensujących jest nie więcej niż kilkanaście. Są to baterie kondensatorów i silniki synchroniczne napędzające wentylatory, pompy wody czy przetwornice w napędach Leonarda.

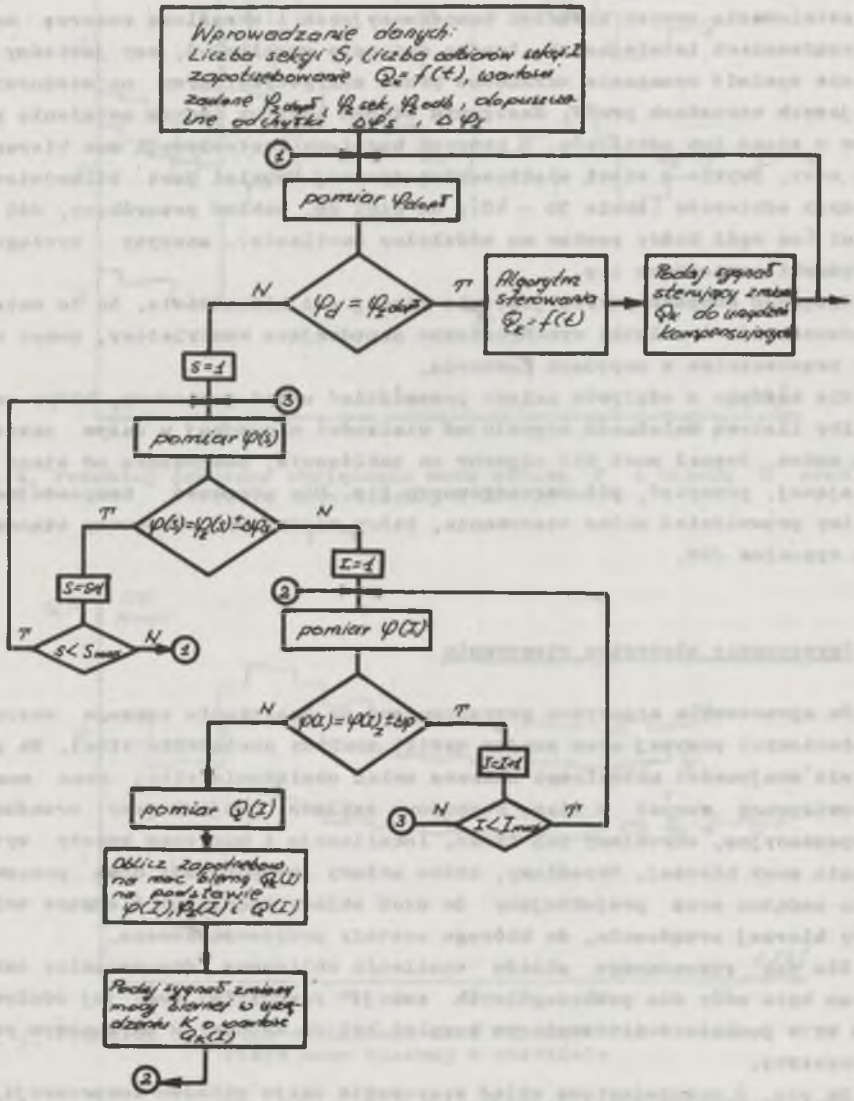
Dla każdego z odpływów należy przewidzieć układ pomiarowy, który zapewniałby liniową zależność sygnału od wielkości mierzonej w całym zakresie ich zmian. Sygnał musi być odporny na zakłócenia, pochodzące od sieci zasilającej, przepięć, pól magnetycznych itp. Dla urządzeń kompensujących musimy przewidzieć układ sterowania, który mógłby być sterowany standardowym sygnałem JSS.

4. Opracowanie algorytmu sterowania

Do opracowania algorytmu przystępujemy po spełnieniu szeregu warunków wymienionych powyżej oraz znając wyniki analizy obciążenia sieci. Na podstawie znajomości aktualnego zakresu zmian obciążenia sieci oraz znając przewidywany wzrost w miarę rozbudowy zakładu, projektujemy urządzenia kompensacyjne, określamy ich ilość, lokalizację i moc oraz koszty wytwarzania mocy biernej. Określamy, które układy kompensacji będą pracowały jako nadążne oraz projektujemy do nich układy regulacji śledzące zmiany mocy biernej urządzenia, do którego zostały przyporządkowane.

Dla tak rozeznanego układu zasilania obliczamy dopuszczalny zakres zmian kąta mocy dla poszczególnych sekcji rozdzielni oraz jej odpływów, tak by w punkcie rozliczeniowym kopalni był on zgodny z narzuconym przez energetykę.

Na rys. 6 przedstawiono układ sterowania całym układem kompensacji. Będzie on kontrolował wartość kąta mocy w punkcie zasilania i o ile jest on zgodny z narzuconym, będzie sterował urządzeniami kompensacyjnymi we-



Rys. 6. Schemat blokowy układu sterowania układem kompensacji o S sekcjach i I odbiorach w sekcji

dług zapotrzebowania dobowego na dany dzień. Zapotrzebowanie to będzie zmienne w zależności od dnia tygodnia, miesiąca i zaprogramowane w pamięci układu sterowania.

Zgodność kąta mocy w punkcie zasilania oznacza równocześnie, że kąt mocy w poszczególnych punktach sieci mieści się w narzuconych granicach. W przypadku gdy kąt mocy w punkcie zasilania różni się od zadanego, układ sprawdza kolejno kąt mocy w poszczególnych sekcjach rozdzielni. Natrafiając na sekcję, w której występuje nadmierna odchyłka od wartości zadanej, sprawdza zapotrzebowanie na moc bierną i kąt mocy w poszczególnych odpływach. Dla odpływu, w którym zmieniło się obciążenie, a tym samym kąt mocy, układ oblicza wymaganą wartość mocy biernej, jaką należy dostarczyć do tej sekcji układu, tak by kąt mocy sekcji mieścił się w zadanym przedziale. Równocześnie układ wysyła sygnał do urządzenia kompensującego (najbliższego od punktu zapotrzebowania wytwarzającego moc najtaniej) określający wielkość mocy, którą należy podać do sieci. Algorytm sterowania opisany powyżej można rozbudować tak, by spełniał inne funkcje związane z gospodarką mocą bierną, Do programu można wprowadzić obliczanie kosztów energii dla poszczególnych oddziałów, sygnalizację w przypadku przeciążenia któregoś odpływu, lub wprowadzić algorytm zmian w zasilaniu poszczególnych odbiorców na wypadek awarii. Do realizacji powyższych funkcji przewidziano układ cyfrowy zbudowany w oparciu o mikroprocesor Intel 8080. Układ taki jest obecnie budowany i będzie wdrożony w jednej z kopalń węgla kamiennego.

5. Wniosek końcowy

Wzrost cen energii elektrycznej zmusza zakłady do poszukiwania rozwiązań mających na celu zmniejszenie opłat za energię elektryczną. Jednym z takich rozwiązań jest zmniejszenie opłat za dodatkową energię bierną pobraną lub oddaną do sieci, które przeciętnie w kopalniach węgla kamiennego wynoszą około kilkaset tysięcy złotych miesięcznie. Rozwiązanie gospodarki mocą bierną tak, by narzucony przez energetykę $tg\varphi$ był dotrzymywany, zamortyzuje się w ciągu kilku lat. Zastosowanie do tego celu układów cyfrowych LSI pozwala dokładnie realizować założony program kompensacji oraz zapewnia dużą niezawodność pracy systemu.

LITERATURA

[1] Lawera E., Wolski A.: Automatyzacja kompensacji mocy biernej w układach elektroenergetycznych Kopalń Węgla Kamiennego. Materiał VI Międzynarodowej Konferencji Automatyzacji Górnictwa 1980.

[2] Lawera E., Mikrut M., Kapuścik J.: Potrzeby i możliwości automatyzacji układów elektroenergetycznych Kopalń Węgla Kamiennego. Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Automatyzacji Górnictwa 1980.

[3] Wolski A.: Możliwości oszczędności energii elektrycznej przez właściwy dobór i unowocześnienie napędu elektrycznego kopalnianych maszyn wyciągowych. Gospodarka Paliwami i Energią nr 6, 1979.

Recenzent: doc. dr inż. Michał Tall

Wpłynęło do redakcji dn. 15.VI.1982 r.

ВОЗМОЖНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ НА КАМЕННОУГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Р е з ю м е

В статье изложены технические возможности реализации комплексной компенсации реактивной мощности шахтной электроэнергетической сети. Даны условия которые нужно учесть при анализе нагрузки шахтной сети и метод определения алгорифма управления компенсационными системами. В конце статьи приводится также пример блок-схемы системы управления.

POSSIBILITIES OF THE AUTOMATIZATION OF THE ELECTRICAL POWER ECONOMY IN THE COAL - MINE LECTRICAL NETWORK

S u m m a r y

Technical possibilities of the realization of the complex reactive power compensation in the coal-mine electrical network are presented. Conditions for an analysis of the coal-mine network load, and a method of working out an algorithm for the control of the compensation system are given. The example of an block-diagram of the control system is also given.