

mgr inż. Edward PACHOLSKI

KGHM "Polska Miedź" S.A. O/ZWR, 59-101 Polkowice, ul. Kopalniana 1, e-mail: e.pacholski@kgm.pl

ŹRÓDŁA ENERGII BIERNEJ. WYBÓR ROZWIĄZAŃ OPTYMALNYCH OGNANICZAJĄCYCH PRZEPIŁYWY ENERGII BIERNEJ W ELEKTROENERGETYCZNEJ SIECI KGHM "Polska Miedź" S.A.

W opracowaniu omówiono niektóre problemy eksploatacyjne występujące w rozległej sieci elektroenergetycznej Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud. Wskazano źródła energii biernej i przyczyny pogarszania się jakościowych parametrów sieci. Przedstawiono wybrane i stosowane w Zakładzie Wzbogacania Rud sposoby przeciwdziałania negatywnym zjawiskom sieciowym. Podkreślono zarówno potrzebę kompensacji jak też ograniczania zużycia energii biernej w zakładowej sieci elektroenergetycznej. Zwrócono uwagę na optymalne wykorzystanie silników synchronicznych do kompensacji mocy biernej oraz omówiono ekonomiczno-techniczne aspekty takiej kompensacji. Wskazano też kierunki działań rozwojowych z wykorzystaniem energooszczędnych silników elektrycznych nowej generacji, zmierzające do obniżenia zużycia energii elektrycznej i ograniczenia mocy biernej.

1. WPROWADZENIE

KGHM „Polska Miedź S.A.” należy do największych przedsiębiorstw produkcyjnych w Polsce. Skupia w sobie kilka oddziałów związanych z wydobywaniem i przetworzeniem rudy miedzi. Posiada też jeden z największych potencjałów energetycznych w odniesieniu do zakładów przemysłowych. Moc pobierana w ramach całego przedsiębiorstwa wynosi bowiem ok.330MW. Przedsiębiorstwo dysponuje ogromną i rozległą siecią energetyczną, wynikającą nie tylko z mocy zainstalowanej lecz także z uwagi na rozległość obszarów, na których zlokalizowane są poszczególne Oddziały. Pod względem ilości pobieranej energii elektrycznej a także obszaru i ilości zainstalowanych urządzeń elektrycznych największym Oddziałem KGHM "Polska Miedź" S.A. jest Oddział Zakłady Wzbogacania Rud. Jest on zlokalizowany w trzech rejonach, ściśle związanych z poszczególnymi Oddziałami Zakładów Górniczych: O/ZG „Lubin”, O/ZG „Polkowice-Sierszowice” i O/ZG „Rudna”.

W poszczególnych obiektach funkcjonują przede wszystkim instalacje o napięciu 6kV, 500V oraz 380/220V. W skład instalacji obiektowych wchodzi zarówno urządzenia transformatorowo – rozdzielcze, jak i urządzenia odbiorcze wraz z układami połączeń. Podstawowymi urządzeniami transformatorowo – rozdzielczymi są:

- rozdzielnice ś/n w liczbie 56 szt.,
- główne rozdzielnice nn w liczbie ponad 100 szt.
- transformatory olejowe i suche o mocy do 1600kVA w liczbie ponad 200 szt.

Poza tym w poszczególnych obiektach O/ZWR pracuje łącznie ponad 1000 szt. innych obiektowych rozdzielnic nn.

Urządzenia odbiorcze O/ZWR to przede wszystkim:

- silniki 6kV o mocy do 1250kW w liczbie ponad 160 szt. stanowiące napędy młynów, kruszarek, przenośników, pomp, turbodmuchaw, sprzężarek.

- silniki nn o mocy do 500kW w liczbie ok. 3500 szt. stanowiące napęd wszystkich pozostałych maszyn przeróbczych jak podawaczy, przenośników, maszyn flotacyjnych, pomp, klasyfikatorów, itp.
- instalacje elektryczne O/ZWR to także wyposażenie elektryczne ok. 120 dźwignic, ponad 10.000 punktów świetlnych, ok. 100 wzbudnic (*prądnic*), ok. 100km kabli 6kV.

W obiektach O/ZWR zainstalowano ok. 220MW mocy przy całkowitym zapotrzebowaniu wynoszącym ponad 95MW. Roczne zużycie energii elektrycznej przez O/ZWR waha się na poziomie ok. 760GWh. Przy tak dużym poborze energii elektrycznej bardzo istotną rolę odgrywa racjonalna gospodarka energią elektryczną. Dotyczy to zarówno poboru mocy czynnej jak i mocy biernej oraz zachowania wymaganych parametrów sieciowych, w tym właściwego współczynnika mocy i odpowiedniej czystości sieci. Wymogi dotyczące parametrów sieci określone zostały w Prawie Energetycznym i związanych z nim przepisach wykonawczych (Rozporządzeniach Ministra Gospodarki, tj. Rozporządzeniu przesyłowym i taryfowym). Spełnienie wszystkich wymogów w tak ogromnej sieci nie jest więc sprawą łatwą.

2. ŹRÓDŁA ENERGII BIERNEJ.

W rozległej i złożonej sieci elektroenergetycznej Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud niewątpliwie występują różne, często negatywne zjawiska, których źródłem są same odbiorniki i urządzenia elektroenergetyczne, błędy eksploatacyjne jak też i zła jakość energii dostarczanej od dostawcy energii, wynikająca także ze znacznego wpływu innych sieci elektroenergetycznych pobliskich dużych zakładów przemysłowych. Głównym konsumentem mocy biernej są odbiorniki, których zasada działania polega na wytwarzaniu pola magnetycznego. Są to w większości elektryczne urządzenia napędowe, transformatory, zgrzewarki i spawarki. Odbiorniki te w celu właściwego funkcjonowania muszą pobierać z sieci elektroenergetycznej moc bierną indukcyjną, która musi zostać przesłana od dostawcy energii. Niesie to oczywiście za sobą określone konsekwencje i nie pozostaje obojętne w stosunku do opłat za energię elektryczną. Sama sieć elektroenergetyczna wraz z innymi odbiornikami energii elektrycznej jest także odbiornikiem / źródłem mocy biernej. Ograniczenie przepływu mocy biernej w sieci elektroenergetycznej jest sprawą niezwykle istotną z ekonomicznego i technicznego punktu widzenia i należy podejmować wszelkie próby zmierzające do zrealizowania tego zamierzenia.

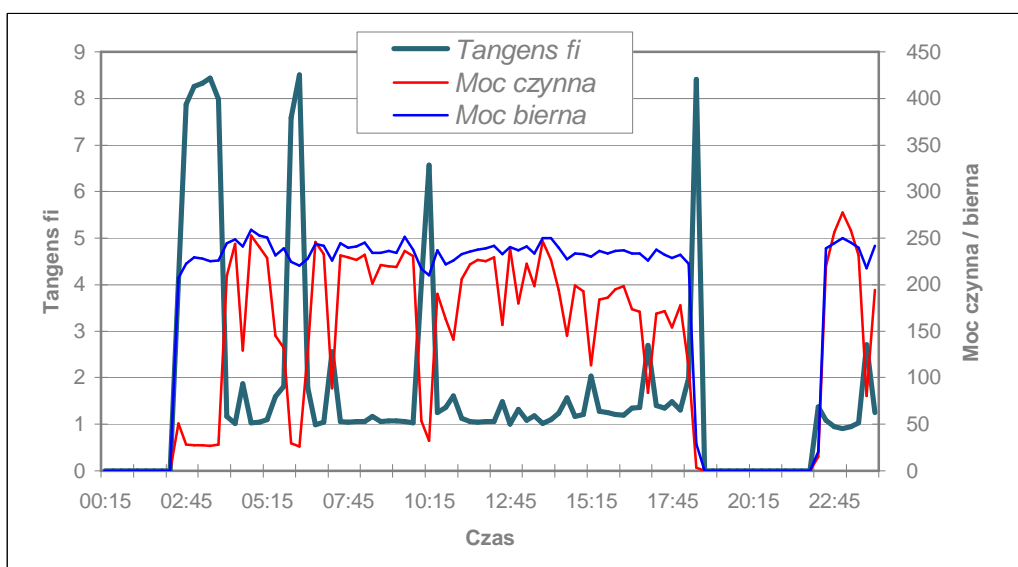
3. ŹRÓDŁA ZAKŁÓCEŃ SIECIOWYCH

Niezależnie od przesyłanej mocy biernej, w oczywisty sposób ograniczającej możliwości sieci elektroenergetycznej (przepustowość linii przesyłowych i transformatorów, zwiększone spadki napięć i straty przesyłowe) w sieci elektroenergetycznej występują ponadto inne zjawiska, wpływające na złą jakość energii elektrycznej. Obecność urządzeń energoelektronicznych i innych odbiorników energii o nieliniowej charakterystyce sprawia, że w sieci tej występują wyższe harmoniczne prądu i napięcia. Pochodzą one głównie od takich urządzeń jak: przemienniki częstotliwości, urządzenia łagodnego rozruchu, prostowniki, układy tyrystorowe, zgrzewarki i spawarki, piece indukcyjne, urządzenia przesyłowe i przetwarzające - w szczególności w okresach stanów dynamicznych. Racjonalna gospodarka mocą to podejmowanie wszystkich możliwych technicznie i ekonomicznie uzasadnionych przedsięwzięć w celu poprawy jakości energii, ograniczenia jej zużycia i obniżenia opłat za jej zużycie.

4. GOSPODARKA MOCĄ BIERNĄ.

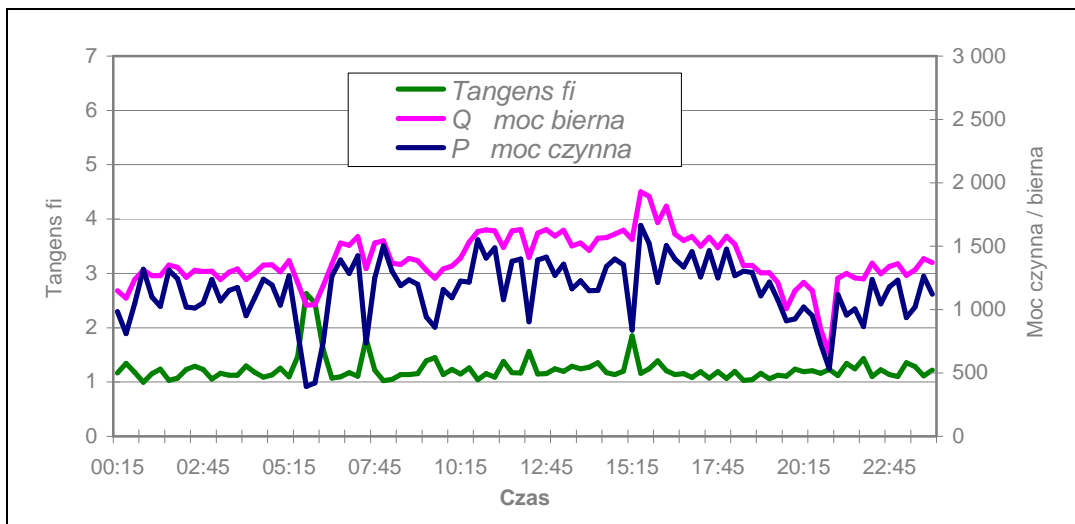
Zmiana sposobu rozliczania nieskompensowanej mocy biernej oraz okresowe podwyżki cen energii sprawiły, że w ciągu ostatnich lat znacznie wzrosło zainteresowanie kompensacją mocy biernej. Optymalizacja kosztów to nie jedyny powód, dla którego należy posiadać sprawny

układ kompensacji. Utrzymanie zadanego współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ w przedziale 0,2 - 0,4 pozwala znacznie zmniejszyć tzw. straty przesyłu oraz w pełni wykorzystać przepustowość transformatorów i kabli zasilających. Skuteczna kompensacja eliminuje opłaty za moc bierną i zmniejsza o 3 7% opłaty za moc czynną. Toteż w Oddziale Zakłady Wzbogacania Rud sprawa kompensacji mocy biernej nabiera szczególnego znaczenia zważywszy, że opłaty za energię elektryczną stanowią tam 25.....30% wszystkich kosztów w całym procesie produkcyjnym. Zużycie energii elektrycznej związane jest z pracą urządzeń napędowych, opartych w dużej mierze na silnikach asynchronicznych.. Spory odsetek urządzeń napędowych średniego napięcia to silniki synchroniczne i asynchroniczne synchronizowane. W warunkach Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud ponad 90% zużycia całej energii elektrycznej przypada na urządzenia napędowe, toteż właściwy dobór jednostek napędowych jest sprawą niezwykle ważną. Proces produkcyjny sprawia jednak, że obciążenie maszyn ulega dużym wahaniom i nie jest możliwe optymalne wykorzystanie mocy maszyn elektrycznych. Z tych powodów wiele maszyn elektrycznych jest niedociążonych, a niektóre napędy są obciążone nawet poniżej 50% swojej mocy znamionowej. Przykładowy przebieg obciążenia silnika asynchronicznego w układzie napędowym kruszarki młotkowej przedstawiono na **Rys. 1**.



Rys. 1. Przykładowy wykres zmian współczynnika mocy silnika asynchronicznego przy zmieniającym się obciążeniu maszyny (napęd kruszarki młotkowej 320kW, 6kV).

Wszystko to sprawia, że praca tych maszyn prowadzi do znacznego pogarszania współczynnika mocy.



Rys. 2. Przykładowy dobowy rozkład mocy czynnej i biernej w nieskompensowanej sieci elektroenergetycznej (Rejon ZWR Polkowice, rozdzielnia RWN-3.3 6kV).

Monitorując naturalny współczynnik mocy w nieskompensowanej sieci (**Rys. 2**), co ma miejsce w rozdzielnicach, w których nie ma narzędzi do kompensacji mocy biernej, można stwierdzić, że zapotrzebowanie mocy biernej układów elektroenergetycznych jest prawie tego samego rzędu co zapotrzebowanie mocy czynnej [2]. Tak duża moc bierna w układzie elektroenergetycznym jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym i wywołuje negatywne skutki w postaci dodatkowego obciążenia cieplnego elementów sieci, zwiększa straty mocy czynnej, powoduje znaczne spadki napięć i wymusza konieczność przewymiarowania przekrojów linii przesyłowych i instalacji elektroenergetycznej. W trosce o prowadzenie prawidłowej i racjonalnej gospodarki elektroenergetycznej, Oddział Zakłady Wzbogacania Rud jest zainteresowany wprowadzeniem skutecznych metod poprawy istniejącego stanu, poprzez:

- działania organizacyjno-techniczne, zmierzające do ograniczania poboru mocy biernej,
- kompensację mocy biernej przy pomocy wszystkich dostępnych a ekonomicznie uzasadnionych sposobów poprawy współczynnika mocy.

4. WYMAGANIA SIECIOWE

W sieci elektroenergetycznej Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud wymagane jest utrzymanie współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ na poziomie nie wyższym niż 0,4. Ponadto konieczne jest także dotrzymanie standardów jakościowych energii elektrycznej w zakresie poziomu zakłóceń i wartości wyższych harmonicznych, odniesionych do harmonicznej podstawowej. Obecność odbiorów indukcyjnych i urządzeń energoelektronicznych (falowniki, softstarty, tyrystory, urządzenia o szybkozmiennych przebiegach) w dużym stopniu pogarsza te parametry powodując, że odbiegają one znacznie od wymaganych. Niedotrzymanie parametrów oznacza w konsekwencji:

- wzrost opłat za energię elektryczną,
- dodatkowe opłaty za ponadnormatywny pobór energii biernej,
- dodatkowe straty przesyłowe (przeciążenie linii przesyłowych, transformatorów),
- zwiększone spadki napięć i dyskomfort pracy maszyn elektrycznych,
- zwiększone koszty remontów urządzeń elektroenergetycznych, związane z intensywniejszą pracą maszyn, degradacją izolacji uzwojeń w wyniku przeciążeń oraz występowaniem niekorzystnych zjawisk rezonansowych i obecnością wyższych harmonicznych.

Względy te przemawiają za potrzebą podejmowania działań, zmierzających do utrzymania właściwych parametrów sieciowych.

5. SPOSOBY OGRANICZANIA MOCY BIERNEJ I POPRAWY JAKOŚCI ENERGII.

W celu ograniczenia mocy biernej i poprawy jakości energii elektrycznej w sieci elektroenergetycznej służby energetyczne podejmują różne techniczne i organizacyjne działania. Ograniczenie mocy biernej, to zarówno działania **zmniejszające konsumpcję** tej mocy jak też i **wszelkie działania kompensacyjne**. Stosowanie właściwych narzędzi zabezpieczeń sieci elektroenergetycznej przed pogorszeniem jakości energii to nie tylko wymóg obowiązujących przepisów, lecz także potrzeba chwili. Zła jakość energii ma swoje konsekwencje w niewłaściwej pracy maszyn i urządzeń elektrycznych, systemów sterowania i nadzoru a także niezwykle istotnych systemów zabezpieczeń układów elektroenergetycznych. Ma to zarówno implikacje ekonomiczne jak też stwarza określone problemy techniczne i eksploatacyjne. Jest powodem przyspieszonego zużycia i degradacji maszyn i urządzeń, jedną z wielu przyczyn negatywnych zjawisk sieciowych takich jak: nieprawidłowe działanie układów zabezpieczeń, wyłączania fragmentów sieci, zjawiska rezonansowe, nadmierne nagrzewanie się i zwiększone straty w obwodzie magnetycznym maszyn elektrycznych, przyspieszona degradacja izolacji, zwiększony poziom hałasu maszyn elektrycznych, szумы wysokoczęstotliwościowe, zapady napięcia itp.

5.1. KOMPENSACJA MOCY BIERNEJ.

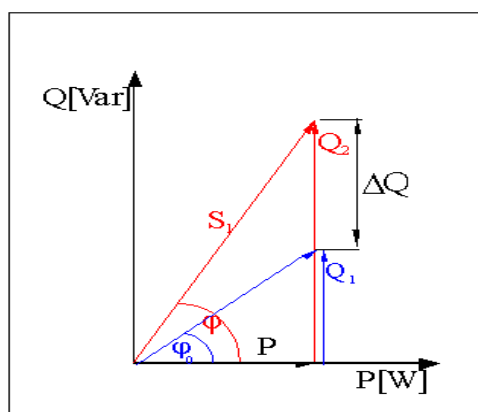
Ponieważ nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie poboru energii biernej i jej przepływu w sieci elektroenergetycznej, konieczne jest więc jej kompensowanie, by w maksymalnym stopniu ograniczać jej ujemny wpływ na urządzenia elektroenergetyczne. W Oddziale Zakłady Wzbogacania Rud bezsprzecznie istnieje potrzeba prowadzenia prawidłowej gospodarki mocą, w tym mocą bierną. Nic więc dziwnego, że sprawa kompensacji mocy biernej w O/ZWR jest sprawą priorytetową [3]. Wykorzystuje się tu wszystkie możliwe i dostępne narzędzia kompensacyjne, by sprostać wymaganiom w zakresie parametrów sieciowych [5]. W poszukiwaniu skutecznych narzędzi kompensacji sieci elektroenergetycznej każdorazowo konieczne jest przeprowadzenie rachunku ekonomicznego, by stosowane narzędzie nie było zbyt kosztowne. Potrzebna jest więc szczegółowa analiza efektywności wykorzystania już istniejących, lecz drogich w eksploatacji narzędzi kompensacyjnych jakimi są silniki synchroniczne i nakładów finansowych niezbędnych do stworzenia nowych narzędzi kompensacyjnych, tańszych w późniejszej eksploatacji. Wynik takiej analizy umiejętnie połączony z autentycznymi technicznymi możliwościami kompensacyjnymi poszczególnych narzędzi kompensujących wskazuje kierunek modernizacji sieci elektroenergetycznej.

5.1.1. METODY KOMPENSACJI

Kompensacja mocy biernej w sieci elektroenergetycznej polega na takim skojarzeniu odbiorników energii elektrycznej, by charakter sieci odpowiadał wymaganiom w zakresie utrzymania właściwych parametrów sieci. Najogólniej rzecz ujmując, można stwierdzić, że niekorzystny współczynnik mocy, wynikający z dużego udziału odbiorów o charakterze indukcyjnym może być ograniczany (kompensowany) poprzez włączenie do sieci odbiorników o charakterze pojemnościowym. Ideę kompensacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej w sposób schematyczny przedstawia **Rys. 3**.

W praktyce istnieją dwa sposoby kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych. Są to :

- naturalny sposób poprawy parametrów sieci,
- sztuczny sposób skompensowania sieci.



$$\operatorname{tg}\varphi = Q/P$$

$$Q_1 = P * \operatorname{tg}\varphi_0$$

$$Q_2 = P * \operatorname{tg}\varphi$$

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1$$

$$\Delta Q = P * \operatorname{tg}\varphi - P * \operatorname{tg}\varphi_0$$

$$\Delta Q = P * (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_0)$$

$\operatorname{tg}\varphi_0$ - wymagany poziom współczynnika mocy

P - poziom mocy czynnej

Q₁ - poziom mocy biernej przy $\operatorname{tg}\varphi_0$

Q₂ - poziom mocy biernej przy $\operatorname{tg}\varphi$

S - poziom mocy pozornej

ΔQ - ilość mocy biernej potrzebnej do skompensowania mocy biernej do wymaganego poziomu $\operatorname{tg}\varphi_0$

Rys. 3. Schemat przedstawiający ideę kompensacji mocy biernej.

Dla prostych sieci elektroenergetycznych, przy niewielkiej ilości odbiorów indukcyjnych sposób naturalny może okazać się wystarczającym do utrzymania wymaganych parametrów zwłaszcza, gdy wymagania te są niewielkie. W dużych, rozległych i złożonych sieciach elektroenergetycznych ten sposób kompensacji jest już niewystarczający i konieczne jest stosowanie sztucznych metod poprawy parametrów sieci. Narzędzia jakimi można wprowadzać poszczególne sposoby kompensacji podano w **Tablicy nr 1**.

Tablica nr 1. Przykłady sposobów realizacji naturalnej i sztucznej kompensacji mocy biernej.

Naturalny	Sztuczny
<ul style="list-style-type: none"> - dobór silników o właściwej mocy i zamiana silników niedociążonych na mniejsze, - niedopuszczanie do pracy jałowej silników i transformatorów, - wyłączenie spawarek transformatorowych podczas przerw w spawaniu, - instalowanie silników synchronicznych zamiast indukcyjnych. 	<ul style="list-style-type: none"> - instalowanie baterii kondensatorów, - instalowanie kompensatorów wirujących, - przewzbudzenie silników asynchronicznych synchronizowanych.

Pod względem zasięgu działań kompensacyjnych i sposobu realizowania kompensacji, można wyróżnić:

- kompensację indywidualną (w tym kompensację silnikową),
- kompensację grupową,
- kompensację centralną.

Kompensacja indywidualna ma odniesienie jedynie do pojedynczych urządzeń (odbiorników indukcyjnych) i nie może służyć kompensacji całej sieci. Stosowanie bowiem jedynie kompensacji indywidualnej dla skompensowania całej rozległej sieci elektroenergetycznej teoretycznie byłoby możliwe, lecz ze względu na mnogość wymaganych zespołów kompensujących musi być wykluczone. Dlatego zastosowanie tej metody kompensacji ogranicza się jedynie do skompensowania mocy biernej dużych odpywów indukcyjnych.

Kompensacja grupowa dotyczy poprawy parametrów pewnych fragmentów sieci i odnosi się do grupy urządzeń (np. odbiory zasilane z jednej rozdzielnicy).

Kompensacja centralna ma za zadanie doprowadzić do uzyskania właściwych parametrów sieci postrzeganej od strony zasilania (na przyłączach), nie prowadzi jednak do poprawnego skompensowania całej sieci wewnętrznej.

Każda z metod kompensacji może być zastosowana do kompensowania sieci elektroenergetycznej, lecz jej skuteczność jest różna. Dla realizacji poszczególnych metod kompensacji konieczne jest spełnienie pewnych uwarunkowań. O wyborze właściwej metody kompensacji decydują między innymi:

- ilość odbiorów występujących w sieci i wymagających kompensacji,
- ilość przyłączy, dla których muszą zostać spełnione warunki przyłącza,
- wymagany poziom kompensacji sieci,
- stopień złożoności i rozległości sieci,
- możliwości lokalizacji urządzeń kompensujących,
- rodzaje odbiorów i ich charakter,
- obecność wyższych harmonicznych w sieci elektroenergetycznej i ich poziom.

Mając na uwadze poprawne skompensowanie całej sieci wewnętrznej, utrzymanie warunków przyłączy i ograniczenie strat przesyłowych, konieczne jest zastosowanie kompensacji mieszanej i to także na różnych poziomach napięć (zarówno w sieci średniego jak i niskiego napięcia).

Aktualnie w sieci elektroenergetycznej O/ZWR stosowana jest:

- kompensacja silnikowa we wszystkich Rejonach Oddziału,
 - kompensacja indywidualna przy pomocy baterii kondensatorowych w Rejonie ZWR Lubin dla 2 napędów turbodmuchaw,
 - kompensacja grupowa dla Rejonu ZWR Polkowice na poziomie śn w obiekcie Suszarni.
- Rodzaje kompensacji z wyszczególnieniem ich wad i zalet przedstawiono w **Tablicy nr 2**.

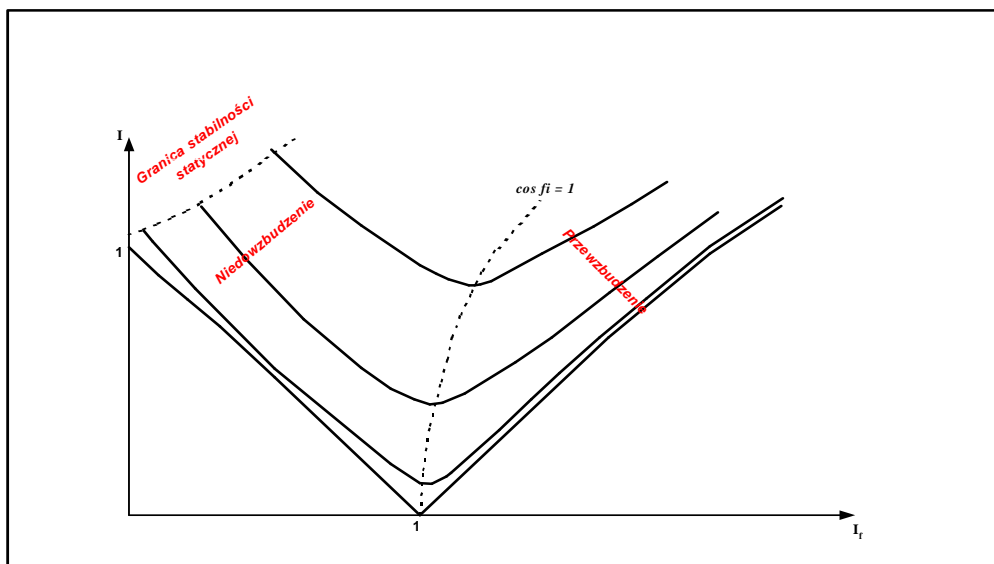
Tablica nr 2. Metody kompensacji mocy biernej z wyszczególnieniem zalet i wad każdej z metod.

Metody kompensacji mocy biernej	Zalety	Wady
kompensacja indywidualna	<ul style="list-style-type: none"> - kompensacja następuje w miejscu powstawania energii biernej, - odciąża całą sieć, - wymagana mała moc baterii, - nie wymaga drogich układów regulacyjnych i baterii wielostopniowych. 	<ul style="list-style-type: none"> - zapewnia utrzymanie wymaganego poziomu $\text{tg}\varphi$ tylko dla jednego odbiornika, - wyłączenie urządzenia kompensowanego pociąga za sobą wyłączenie baterii, - wymaga stosowania dużej ilości jednostek kompensujących, - nie kompensuje sieci w całości.
kompensacja grupowa	<ul style="list-style-type: none"> - ograniczona ilość baterii w stosunku do kompensacji indywidualnej - kompensuje pewne fragmenty sieci wewnętrznej (bliżej źródła), 	<ul style="list-style-type: none"> - mało dostosowuje się do potrzeb sieci, - wymaga stosowania często automatycznych, wielostopniowych baterii z układami regulacyjnymi, - kompensuje jedynie grupę urządzeń, a nie całą sieć, - droższa od kompensacji centralnej ze względu na większą ilość wymaganych baterii kondensatorów.

<p>kompensacja centralna</p>	<ul style="list-style-type: none"> - najmniej kosztowna metoda, - ilość baterii ograniczona, 	<ul style="list-style-type: none"> - zapewnia utrzymanie wymaganego poziomu $\text{tg}\varphi$ tylko w miejscu przyłącza, - sieć wewnętrzna nie jest właściwie skompensowana, - groźba występowania zakłóceń i zjawisk rezonansowych.
<p>kompensacja silnikowa</p>	<ul style="list-style-type: none"> - nie wprowadza dodatkowych zakłóceń sieciowych, - skuteczna metoda kompensacji, - nie wymaga nakładów inwestycyjnych (w O/ZWR Polkowice). 	<ul style="list-style-type: none"> - najbardziej kosztowny sposób kompensacji, - występują znaczne straty energii ponoszone na przewzbudzenie maszyn synchronicznych i synchronizowanych, - następuje przyspieszone starzenie i degeneracja uzwojeń w wyniku nadmiernej eksploatacji maszyn, - nie kompensuje sieci w całości, - wymaga posiadania maszyn synchronicznych.

5.1.2. KOMPENSACJA SILNIKOWA.

Kompensacja silnikowa, jaka ma miejsce w O/ZWR należy do najdroższych sposobów kompensacji mocy biernej sieci elektroenergetycznych. Polega ona na wykorzystaniu zjawiska zmiany charakteru obciążenia silników synchronicznych przy zmieniającym się poziomie ich wzbudzenia. Schematycznie zjawisko to obrazuje **Rys. 4**, przedstawiający powszechnie znane charakterystyki tzw. krzywe „V”.



Rys. 4. Charakterystyki prądowe silnika synchronicznego obrazujące zależność prądu silnika i jego współczynnika mocy od poziomu prądu wzbudzenia.

Zwiększanie poziomu wzbudzenia poprawia współczynnik mocy lecz wiąże się z wydatkowaniem dodatkowej energii elektrycznej [4]. Nic więc dziwnego, że także ze względów oszczędnościowych starano się maksymalnie ograniczać poziom kompensacji silnikowej. Nie dysponując innym narzędziem kompensacji jak tylko silnikami synchronicznymi, jedynym sposobem zmniejszeniem strat energii elektrycznej z tytułu kompensacji stało się ograniczanie

do niezbędnego minimum kompensacji w okresach pozaszczytowych. Dało to szansę na odciążenie silników w okresach pozaszczytowych, które w okresach szczytowych musiały pracować w stanie silnego przewzbudzenia. Nie uniknięto jednak i ujemnej strony takiej kompensacji. W okresach pozaszczytowych w sieci elektroenergetycznej występowały bowiem znaczne straty energii elektrycznej, związane z przesyłem większych mocy biernych.

Tablica nr 3. Roczne straty związane z kompensacją silnikową w O/ZWR w okresach szczytów energetycznych.

P	Q	tgφ	tgφ ₀	ΔQ ₀	ΔP	Koszt ΔE
[kW]	[kVar]	--	--	[kVar]	[kW]	[zł]
97 412,50	55 725,80	0,57	0,40	16 760,80	1 340,86	520 342,39

UWAGA: Obliczenia zostały wykonane na podstawie średnich wartości piętnastominutowych mocy czynnej i biernej zmierzonych na poszczególnych zasilaniach w O/ZWR Polkowice.

LEGENDA:

P - średnia zmierzona moc czynna piętnastominutowa.

Q - średnia zmierzona moc bierna piętnastominutowa.

tgφ - współczynnik mocy dla zmierzonych wartości mocy czynnej i biernej.

tgφ₀ - współczynnik mocy wymagany przez Zakłady Górnicze w czasie szczytów energetycznych.

ΔQ₀ - ilość dodatkowo wytworzonej mocy biernej potrzebna do utrzymania wymaganego tgφ₀=0,40.

ΔP - moc czynna potrzebna do utrzymania wymaganego tgφ w kompensacji silnikowej

(wg zasady: 80 kW / 1 MVar)

Koszt ΔE - roczny koszt dodatkowo zużytej energii elektrycznej, potrzebnej do utrzymania wymaganego współczynnika mocy, przy pomocy silników synchronicznych.

Jak wynika z załączonej **Tablicy nr 3**, straty mocy czynnej, związane z wydatkowaniem energii czynnej na przewzbudzenie pracujących maszyn synchronicznych, asynchronicznych synchronizowanych i kompensatorów wirujących są znaczne i pociągają za sobą zwiększone opłaty za energię elektryczną [5]. Ograniczenie kompensacji silnikowej jedynie do okresów szczytowych, chociaż korzystne z punktu widzenia obniżenia obciążenia prądowego maszyn elektrycznych nie prowadzi do prostego obniżenia opłat za energię elektryczną, gdyż wzrastają znacznie straty przesyłowe w nieskompensowanej sieci [1]. Toteż okresowe zmniejszanie poziomu wzbudzenia maszyn synchronicznych nie jest ekonomicznie uzasadnione (**Tablica nr 4**), wynika raczej z potrzeby okresowego odciążania maszyn, pracujących w reżimie silnego przewzbudzenia.

Tablica nr 4. Roczne straty przesyłowe w nieskompensowanej sieci elektroenergetycznej O/ZWR w okresach pozaszczytowych.

P	Q	tgφ	tgφ ₀	ΔQ ₀	ΔP	Straty przesyłowe	Koszt strat
[kW]	[kVar]	--	--	[kVar]	[kW]	[kW]	[zł]
97 412,50	55 725,80	0,57	0,40	16 760,80	1 340,86	838,04	550 051,74

UWAGA: Obliczenia zostały wykonane na podstawie średnich wartości piętnastominutowych mocy czynnej i biernej zmierzonych na poszczególnych zasilaniach w O/ZWR Polkowice.

LEGENDA:

P - średnia zmierzona moc czynna piętnastominutowa.

Q - średnia zmierzona moc bierna piętnastominutowa.

tgφ - współczynnik mocy dla zmierzonych wartości mocy czynnej i biernej.

tgφ₀ - współczynnik mocy wymagany przez Zakłady Górnicze w czasie szczytów energetycznych.

ΔQ₀ - ilość dodatkowo wytworzonej mocy biernej potrzebna do utrzymania wymaganego tgφ₀=0,40.

Straty przesyłowe - straty energii z tytułu nieskompensowanej mocy biernej w strefie pozaszczytowej. (ΔQ₀* 5%)

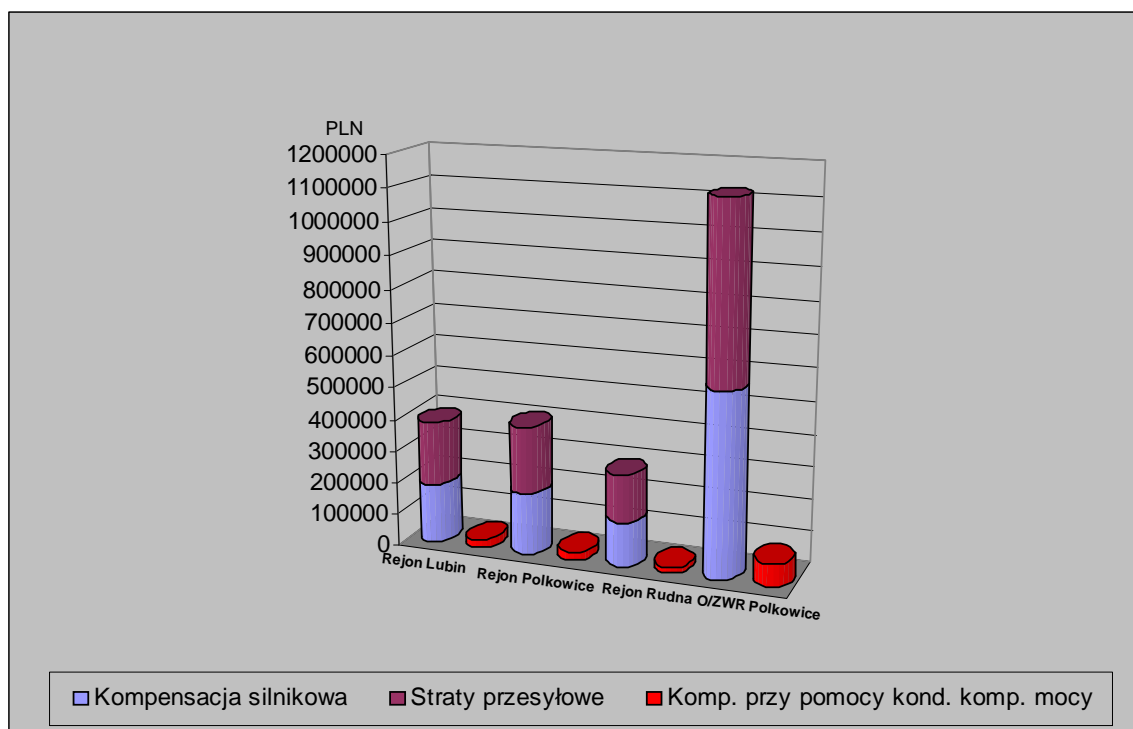
Koszt strat - koszt straty energii z tytułu dodatkowego przesyłu energii w strefie pozaszczytowej.

Warto dodać, że w okresach wysokich temperatur otoczenia zmniejszanie prądu wzbudzenia jest jedynym sposobem utrzymania w ruchu tych maszyn, ponieważ zwiększony prąd wzbudzenia ma bezpośredni wpływ na poziom nagrzewania się pracujących maszyn. Często prowadzi do przekraczania granicznych progów temperatur panewek, co w konsekwencji oznacza awaryjne ich wyłączenie.

Kompensacja silnikowa, jako kompensacja indywidualna dużych maszyn synchronicznych średniego napięcia nie jest jednak w stanie utrzymać wymaganych parametrów sieci w każdym jej fragmencie oraz dotrzymać parametrów przyłącza w każdym układzie sieciowym i dla każdego poziomu obciążenia sieci. Za pomocą silników synchronicznych średniego napięcia nie jest możliwe właściwie skompensowanie rozległej sieci elektroenergetycznej na poziomie niskiego napięcia, gdzie występuje zdecydowana większość silników i odbiorów indukcyjnych. Ponadto, mimo że silniki synchroniczne nie wprowadzają szczególnych zakłóceń do sieci, to także nie są w stanie poprawiać parametrów jakościowych sieci.

Świadomość tego faktu nakazuje poszukiwanie innych skutecznych i mniej kosztownych metod kompensacji mocy biernej, umożliwiających realizowanie taniej całodobowej kompensacji mocy. Takie warunki spełnia niewątpliwie kompensacja przy pomocy baterii kondensatorowych. Porównanie kosztów kompensacji silnikowej z kompensacją przy pomocy kondensatorowych kompensatorów mocy wyraźnie przemawia za stosowaniem kompensacji kondensatorowej (**Rys. 5**).

Niestety, zabudowa kondensatorowych kompensatorów mocy wymaga wydatkowania dużych środków inwestycyjnych. Wymogi w zakresie dotrzymania ustalonego współczynnika mocy na każdym przyłączy nakazują jednak podjęcie takiego wyzwania. W Oddziale Zakłady Wzbogacania Rud podjęto się takiego zadania. Efektem ma być zastąpienie kompensacji silnikowej odpowiednio wykonaną kompensacją kondensatorową. Uwzględniony jednak zostanie i pozostawiony nadal technicznie i ekonomicznie uzasadniony poziom kompensacji silnikowej.

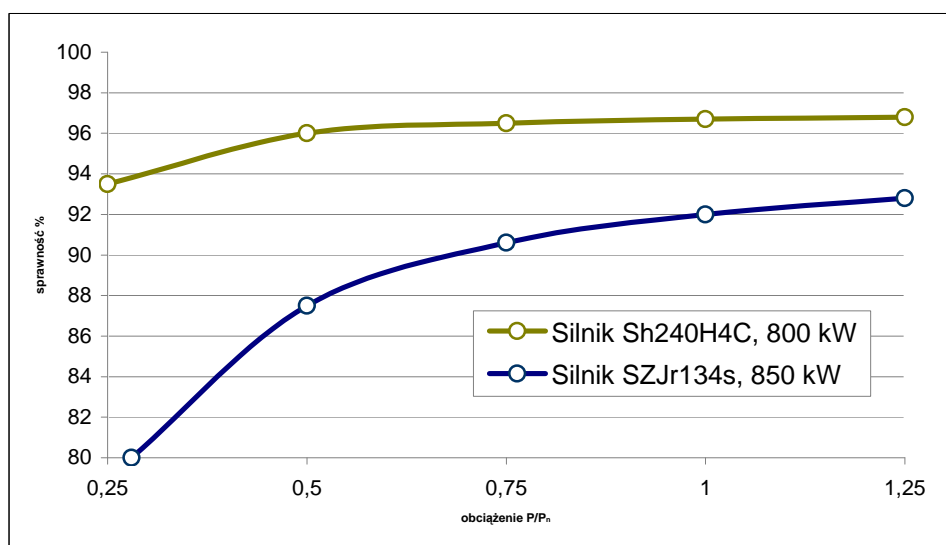


Rys. 5. Porównanie rocznych kosztów kompensacji silnikowej i kosztów strat przesyłowych w nieskompensowanej sieci elektroenergetycznej O/ZWR do przewidywanych kosztów całodobowej kompensacji przy pomocy kondensatorowych kompensatorów mocy.

Ze szczegółowych analiz [5] wynika, że najbardziej korzystna w warunkach O/ZWR jest kompensacja grupową na poziomie średniego i niskiego napięcia. Oczywiście procentowy udział kompensacji na poszczególnych poziomach zależy od szeregu uwarunkowań lokalnych i ograniczeń ekonomicznych. Względy ekonomiczne a także zdecydowanie większe możliwości płynnej regulacji zespołów kompensujących przemawiają za wariantem, w którym udział kompensatorów niskiego napięcia jest możliwie największy. Jednakże bezkrytyczne przyjęcie tego kierunku oznacza, że znacznie pomnożona zostanie ilość zespołów kompensujących, co może stanowić uciążliwość eksploatacyjną i lokalową.

5.2. INNE SPOSOBY OGRANICZANIA MOCY BIERNEJ.

Powszechnie wiadomo, że współczynnik mocy maszyn elektrycznych pracujących w reżimie niewielkiego obciążenia i na tzw. „biegu jałowym” jest zdecydowanie niekorzystny. Silniki elektryczne pracujące w Oddziale Zakłady Wzbogacania Rud w zdecydowanej większości zostały tak dobrane, że ich wykorzystanie kształtuje się na poziomie 0,5...0,8 mocy znamionowej. Podyktowane jest to przede wszystkim potrzebą zapewnienia niezawodności ruchowej urządzeń pracujących w różnych skrajnych warunkach eksploatacyjnych, przy różnym stanie technicznym napędzanych maszyn i urządzeń i przy ich zmiennym obciążeniu. Ten stan rzeczy powoduje, że urządzenia napędowe pracują nie tylko przy obniżonej sprawności, lecz także pogarszają współczynnik mocy w sieci elektroenergetycznej.



Rys. 6. Kształtowanie się sprawności silników elektrycznych starszych typów i energooszczędnych silników nowej generacji w funkcji obciążenia maszyny.

Sprawność i współczynnik mocy silników starszej generacji (a takie występują w Zakładzie) są szczególnie mocno uzależnione od poziomu obciążenia maszyny. W silnikach nowej generacji przebieg zależności sprawności od mocy oddawanej jest płaski. Maksimum sprawności występuje dla obciążenia wynoszącego ok. 0,75 obciążenia znamionowego, co obrazuje Rys. 5. Z rysunku widać także, że jeżeli przy obciążeniu znamionowym różnica sprawności między energooszczędnym silnikiem nowej generacji a starym wynosi ok.4%, to dla obciążenia połową mocy różnica ta wynosi już ponad 8%.

Mamy tu do czynienia nie tylko z oszczędnością energii ale też z ograniczaniem konsumpcji mocy biernej, co oznacza zmniejszenie potrzeb w zakresie kompensacji sieci przy pomocy kosztownych dodatkowych urządzeń kompensujących. Stosowanie silników starej generacji, wielokrotnie już remontowanych i przewijanych zwiększa przepływy mocy biernej w sieci i

niekorzystnie wpływa zarówno na jej parametry jak też zużycie energii czynnej. Stąd też w działalności remontowej i modernizacyjnej ten aspekt musi być brany pod uwagę. Zastępowanie starych i wysłużonych maszyn elektrycznych wysokosprawnymi maszynami o zdecydowanie lepszych parametrach technicznych a także zabudowa energooszczędnych silników w napędach nowych i modernizowanych ma ekonomiczne i techniczne uzasadnienie. Idea ta jest zgodna z światowymi trendami, promowanymi przez światowe oraz krajowe organizacje i programy rozwojowe, takie jak: Polski Program Efektywnego Wykorzystania Energii w Napędach Elektrycznych (PEMP), Krajową Agencję Poszanowania Energii (KAPE), Polskie Centrum Promocji Miedzi (PCPM).

6. WNIOSKI KOŃCOWE.

Osiągnięcie celu, jakim jest ograniczenie mocy biernej w sieci elektroenergetycznej winno więc odbywać się drogą równoległą podejmowanych działań:

1. kompensacji mocy biernej przy pomocy technicznie i ekonomicznie uzasadnionych narzędzi kompensacyjnych,
2. optymalnego doboru jednostek napędowych w nowych i modernizowanych napędach z wykorzystaniem zalet energooszczędnych silników nowej generacji.
3. podejmowaniu technicznie i ekonomicznie uzasadnionych decyzji wymiany maszyn elektrycznych o niskiej sprawności na maszyny o wysokich parametrach technicznych.

Kompensacja silnikowa na poziomie średniego napięcia jest już niewystarczająca do pełnej i prawidłowej kompensacji całej sieci elektroenergetycznej z dotrzymaniem wszystkich warunków każdego przyłącza. Konieczne jest wspomaganie jej innymi narzędziami kompensacyjnymi, jakimi są kondensatorowe kompensatory mocy średniego i niskiego napięcia. Stopień wykorzystania każdej z metod kompensacji zależy od szeregu uwarunkowań. W każdym jednak przypadku wymaga precyzyjnej analizy technicznej i ekonomicznej, by przyjęty wariant rozwiązania był w najbardziej optymalny w określonych warunkach sieciowych. Występowanie dużych maszyn synchronicznych, które dla prawidłowej pracy wymagają już określonego poziomu wzbudzenia przemawia za ich wykorzystaniem jako narzędzi kompensacji na ekonomicznie uzasadnionym poziomie. Nie znajduje jednak uzasadnienia ich maksymalne wykorzystanie w kompensacji sieci, gdyż na określonym poziomie przewzbudzenia stają się zbyt drogim narzędziem kompensacji. Kondensatorowe kompensatory mocy, chociaż znacznie tańsze w eksploatacji, jako narzędzie kompensacji mocy biernej wymagają dużych nakładów na ich zabudowę. Koszty zabudowy są tym większe, im precyzyjniej chcemy wykonać układy regulacyjne, zwłaszcza na poziomie średniego napięcia. Toteż w ogólnej analizie technicznej i ekonomicznej konieczne jest także umiejętne rozdzielenie kompensatorów na określonych poziomach napięć występujących w złożonej sieci elektroenergetycznej. W realizacji pełnej i skutecznej kompensacji mocy biernej należy więc kierować się następującymi przesłankami:

- kompensacja musi prowadzić do skompensowania całej sieci wewnętrznej, zachowując jednocześnie wymagane warunki każdego przyłącza w głównych stacjach transformatorowych,
- należy przyjmować optymalny wariant kompensacji grupowej zarówno na poziomie średniego jak też i niskiego napięcia,
- stosunek podziału mocy zespołów kompensujących dla poszczególnych poziomów napięcia wynikał będzie z dodatkowych uwarunkowań i możliwości lokalowych, jak też z przesłanek ekonomicznych, technicznych i eksploatacyjnych,
- kompensacja kondensatorowa musi być oparta o baterie z automatyczną regulacją mocy w układach z dławikami ochronnymi, skutecznie przeciwdziałających powstawaniu negatywnych zjawisk rezonansowych,
- w ogólnym bilansie mocy należy uwzględnić technicznie i ekonomicznie uzasadniony poziom kompensacji indywidualnej z wykorzystaniem dużych silników synchronicznych, stanowiących napędy młynów i kruszarek młotkowych,

7. LITERATURA.

- [1] Jerzy Niebrzydowski – „Sieci elektroenergetyczne” Białystok 2000r.
- [2] Edward Pacholski , - „Problemy eksploatacyjne występujące w elektroenergetycznych sieciach Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud” - Seminarium naukowo-techniczne Lubiatów, czerwiec 2001r.
- [3] Edward Pacholski – „Gospodarka mocą bierną w KGHM "Polska Miedź" S.A. Oddział Zakłady Wzbogacania Rud w Polkowicach” - Materiały KGHM PM S.A. O/ZWR. Polkowice, czerwiec 2002r.
- [4] Edward Pacholski – „Koszty dodatkowej kompensacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej poszczególnych Rejonów Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud w Polkowicach” - Materiały KGHM PM S.A. O/ZWR. Polkowice, lipiec 2002r.
- [5] Edward Pacholski – „Kompensacja mocy biernej w przemysłowych układach zasilająco-rozdzielczych z napędami synchronicznymi na przykładzie KGHM "Polska Miedź" S.A. Oddział Zakłady Wzbogacania Rud” – Rokosowo, październik 2003r. V Krajowe Seminarium – Techniczne, ekonomiczne i ekologiczne aspekty kompensacji mocy biernej.
- [6] Jerzy Tenerowicz, Zbigniew Sułkowski – „Jakość i użytkowanie energii elektrycznej” Kraków 2000r. Konferencja – Efekty techniczne i ekonomiczne zastosowania kompensacji mocy biernej.