

EDWARD LAWERA

Katedra Elektroenergetyki

PRÓBY POMIAROWEGO OKREŚLENIA WPŁYWU KOMPENSACJI
RÓWNOLEGŁEJ MOCY BIERNEJ NA STABILNOŚĆ PRACY
ENERGETYCZNYCH ODBIORÓW PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. W artykule opisano zakres i wyniki badań pomiarowych mających na celu określenie wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na statyczną stabilność pracy energetycznych odbiorów przemysłowych przy obniżaniu napięcia w węźle odbiorczym. Jako urządzenia kompensacyjne stosowano baterie kondensatorów. Pomiarы przeprowadzone zostały zarówno w układach zamodelowanych jak i w układach wydzielonych z krajowego systemu elektroenergetycznego.

Wstęp

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarowych badań stabilności pracy energetycznych odbiorów przemysłowych i wpływu na nią kompensacji równoległej mocy biernej. Jako czynnik bezpośrednio powodujący naruszenie stabilności pracy odbiorów rozpatrywano zmianę wartości napięcia w węźle odbiorczym. Przeprowadzone wcześniej rozważania teoretyczne i obliczenia analityczne związane z tym problemem [1] [2], [3] pozwoliły na:

- opracowanie metodyki analitycznego badania wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbiorów przemysłowych,
- określenie wpływu warunków pracy i parametrów sieci zasilającej na stabilność pracy odbiorów,
- przeprowadzenie analizy ilościowej wpływu kompensacji mocy biernej na stabilność pracy statystycznie typowych odbiorów w krajowym systemie energetycznym.

Opracowana metodyka analitycznego badania wpływu kompensacji mocy biernej na stabilność pracy odbiorów przemysłowych została oparta o kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$, przy pomocy którego można określić tzw. napięcie krytyczne U_{kr} . Napięcie krytyczne jest granicznym warunkiem stabilności pracy odbioru badanej wg kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$ [2]. Kryterium to jak wykazały wcześniejsze rozważania [2] można również z powodzeniem stosować jako kryterium stabilności pracy silników asynchronicznych.

Celem przeprowadzonych prób pomiarowych było:

- eksperymentalne zbadanie przebiegu zjawiska utraty stabilności pracy odbiorów,
- sprawdzenie słuszności i przydatności opracowanej metodyki badania stabilności pracy odbiorów polegające na doświadczalnym potwierdzeniu mechanizmu działania kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$,
- sprawdzenie jakościowe wpływa kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbiorów,
- porównanie kryteriów $\frac{dQ}{dU} < 0$ i $\frac{dM}{ds} > 0$ jako warunków stabilności pracy silników asynchronicznych.

Warunki pracy odbiorów podczas badań pomiarowych znacznie odbiegały (impedancje układów zasilających, charakterystyki odbiorów, stopnie kompensacji) od warunków typowych przyjętych w badaniach analitycznych. Wynikło to z możliwości technicznych przeprowadzenia pomiarów i uniemożliwiło porównanie ilościowe wyników badań analitycznych i pomiarowych. Przeprowadzanie żmudnych obliczeń analitycznych dla warunków odpowiadających próbom pomiarowym umożliwiające ilościową konfrontację wyników nie było, zdaniem autora, celowe z uwagi na to, że z jednej strony różnice ilościowe wyników można było w pełni uzasadnić (p. pkt 3) z drugiej strony porównanie takie nie stanowiłoby sprawdzianu dokładności analizy przeprowadzonej dla warunków typowych.

Badania pomiarowe zostały przeprowadzone zarówno w układzie zamodelowanym, jak i w systemie rzeczywistym. W obydwu wypadkach badano wpływ kompensacji prowadzonej przy pomocy baterii kondensatorów. W wyniku prób pomiarowych określono napięcia krytyczne w węzłach odbior-

czych, a w układzie zamodelowanym pomierzono również napięcia utyku odbiorów silnikowych.

1. BADANIA PRZEPROWADZONE W UKŁADZIE ZAMODELOWANYM

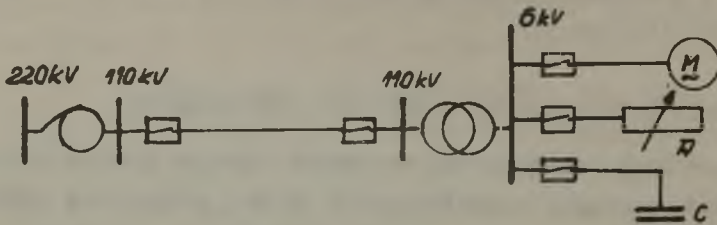
W warunkach rzeczywistych obniżanie napięcia w węźle odbiorczym systemu może nastąpić w wyniku wzrostu poboru mocy, przede wszystkim biernej, w tym węźle bądź też w wyniku obniżenia się wartości napięcia w punkcie, z którego za pomocą układu przesyłowego zasilany jest rozpatrywany węzeł [4]. Ten drugi przypadek może być spowodowany zarówno wzrostem poboru mocy w innych węzłach odbiorczych jak i zakłóceniami w pracy systemu. W przeprowadzonych próbach pomiarowych, zarówno w układzie zamodelowanym jak i w systemie rzeczywistym, zmiany napięcia w węźle odbiorczym prowadzące do naruszenia stabilności pracy odbiorów były realizowane przez zmianę napięcia na początku układu zasilającego węzeł. Kolejne zmiany napięcia były wykonywane co dwie, trzy minuty po ustaleniu się nowych warunków pracy. Model układu elektroenergetycznego, na którym przeprowadzano badania pomiarowe składał się z:

- modelu linii przesyłowej o napięciu 110 kV, przekroju $3 \times 120 \text{ mm}^2$ AFl i regulowanej długości od 20 do 100 km,
- modelu transformatora o przekładni 110/6,6 kV/kV,
- modelu odbioru energetycznego złożonego z silnika asynchronicznego i oporności czynnej o regulowanej wartości.

Moment obciążenia silnika był realizowany przy pomocy hamulca mechanicznego. Model odbioru był wyposażony w baterie kondensatorów podzielone na dwie sekcje, służące do kompensacji równoległej mocy biernej. Wszystkie elementy modelu wykonane były w układzie trójfazowym. Schemat ideowy układu zamodelowanego podano na rysunku 1.

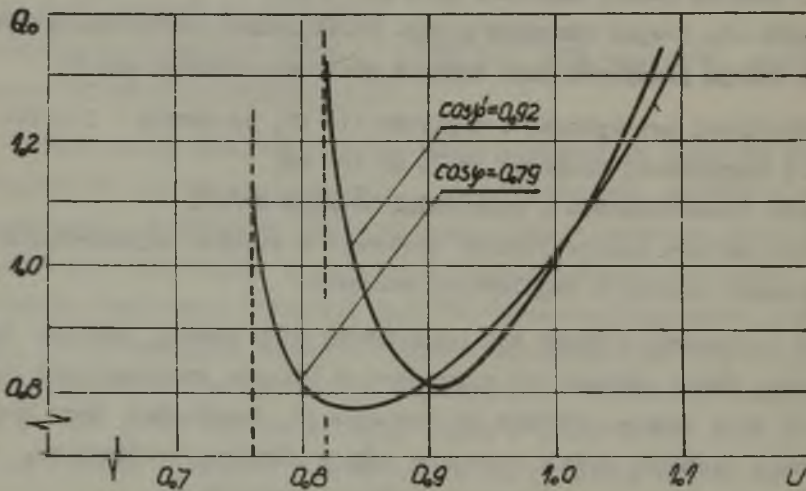
Na opisanym modelu układu elektroenergetycznego wykonano następujące próby pomiarowe:

- a) określenia napięć krytycznych odbioru w warunkach naturalnych przy $\cos \varphi = 0,79$ (obciążenie silnika było znamionowe) oraz po kompensacji, przy pomocy baterii kondensatorów, do $\cos \varphi' = 0,92$,



Rys. 1. Schemat ideowy zamodelowanego układu elektroenergetycznego

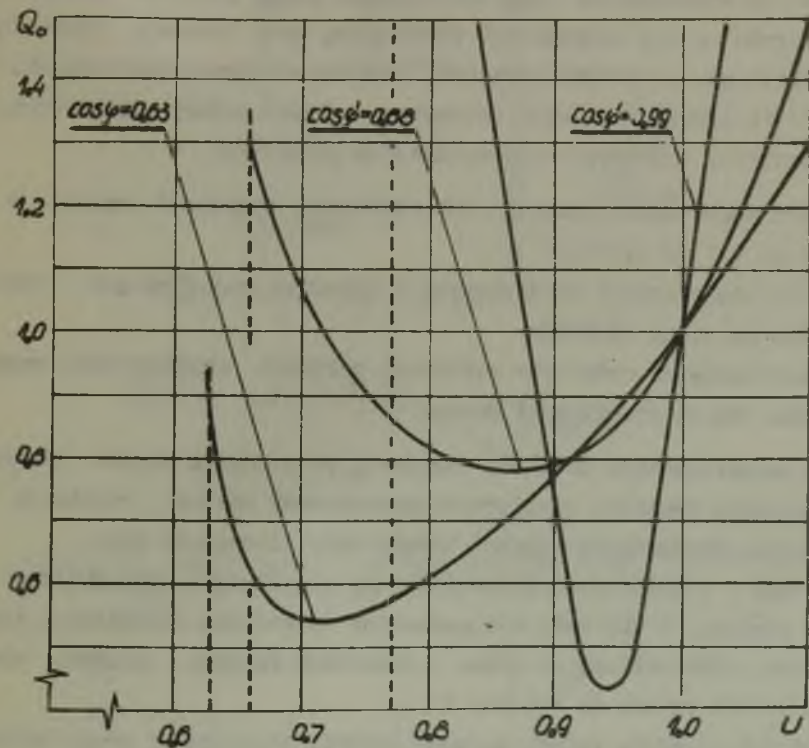
- b) określenia napięć krytycznych odbioru w warunkach naturalnych przy $\cos \varphi = 0,63$ (obciążenie silnika wynosiło 75% obciążenia znamionowego) oraz po kompensacji do $\cos \varphi' = 0,88$ i do $\cos \varphi' = 0,99$,
- c) określania napięć utyku silnika przy obciążeniu znamionowym i obciążeniu równym 75% momentu znamionowego.



Rys. 2. Charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ i napięcia krytyczne U_{kr} , dla naturalnych warunków pracy odbioru - $\cos \varphi = 0,79$ i po kompensacji do $\cos \varphi' = 0,92$ wyznaczone w zamodelowanym układzie elektroenergetycznym

Próba "c" realizowana była poprzez zmianę napięcia na zaciskach silnika. Prowadzone pomiary mocy w węzle odbiorczym podczas prób określonych w punktach "a" i "b" pozwoliły wyznaczyć napięciowe charaktery-

stykł statyczne odbiorów $Q_o = Q_o(U)$ do momentu osiągnięcia wartości napięć krytycznych. Charakterystyki te podano na rysunkach 2 i 3.



Rys. 3. Charakterystyki $Q_o = Q_o(U)$ oraz wartości U_{kr} , dla naturalnych warunków pracy odbioru - $\cos \varphi = 0,63$ i po kompensacji do $\cos \varphi' = 0,88$; $0,99$ wyznaczone w zamodelowanym układzie elektroenergetycznym

Wartości napięć krytycznych, na rysunkach, zaznaczono przy pomocy linii przerywanych. Pomierzone napięcia utyku silnika wynosiły $U_{utk} = 0,63 U_N$ przy obciążeniu znamionowym oraz $U_{utk} = 0,55 U_N$ przy obciążeniu wynoszącym 75% obciążenia znamionowego silnika.

2. PRÓBY POLIAROWE PRZEPROWADZONE W WYDZIELONYCH UKŁADACH SYSTEMU KRAJOWEGO

W celu przeprowadzenia badań stabilności pracy odbiorów przemysłowych i wpływu na nią kompensacji równoległej mocy biernej, koniecznym było wydzielenie z systemu wybranych układów elektroenergetycznych. Konieczność ta podyktowana była szeregiem względów natury technicznej i organizacyjnej, z których najpoważniejsze stanowiły:

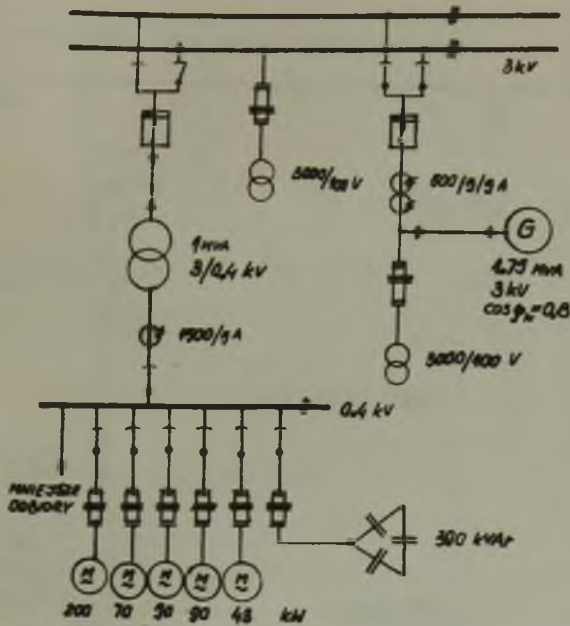
- potrzeba zapewnienia podczas prób skutecznej regulacji napięcia w zakresie od 1,1 do $0,5 U_N$
- uproszczenie operacji łączeniowych w układzie spowodowanych utratą stabilności pracy odbiorów
- zlokalizowanie na wybranych obiektach zakłóceń produkcyjnych spowodowanych utratą stabilności pracy.

Badanie przeprowadzono na dwóch układach, przy czym w obydwu przypadkach regulację napięcia realizowano przy pomocy ręcznej regulacji na generatorze, stanowiącym element układu wydzielonego do prób.

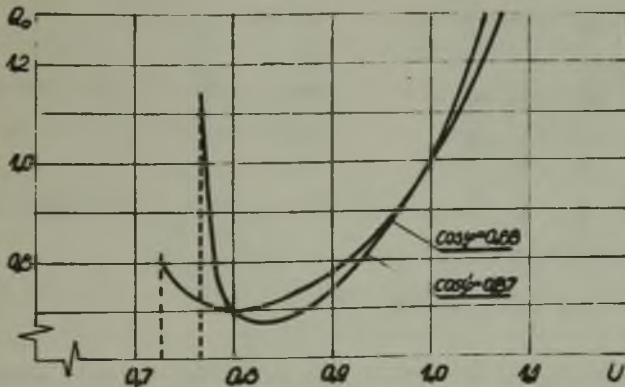
Pierwszy z układów został zrealizowany w zakładzie przemysłowym - fabryce papieru. W układzie tym generator elektrowni zakładowej, pracował poprzez sieć kablową na jeden z oddziałów fabryki. Schemat elektryczny układu podano na rysunku 4.

W podanym układzie przeprowadzono badania stabilności pracy odbioru w warunkach naturalnych, przy współczynniku mocy $\cos \varphi = 0,68$ oraz po kompensacji do $\cos \varphi' = 0,87$. Wyniki pomiarów pozwoliły wyznaczyć charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ badanego odbioru, które z zaznaczeniem wartości napięć krytycznych wykreślone na rysunku 5.

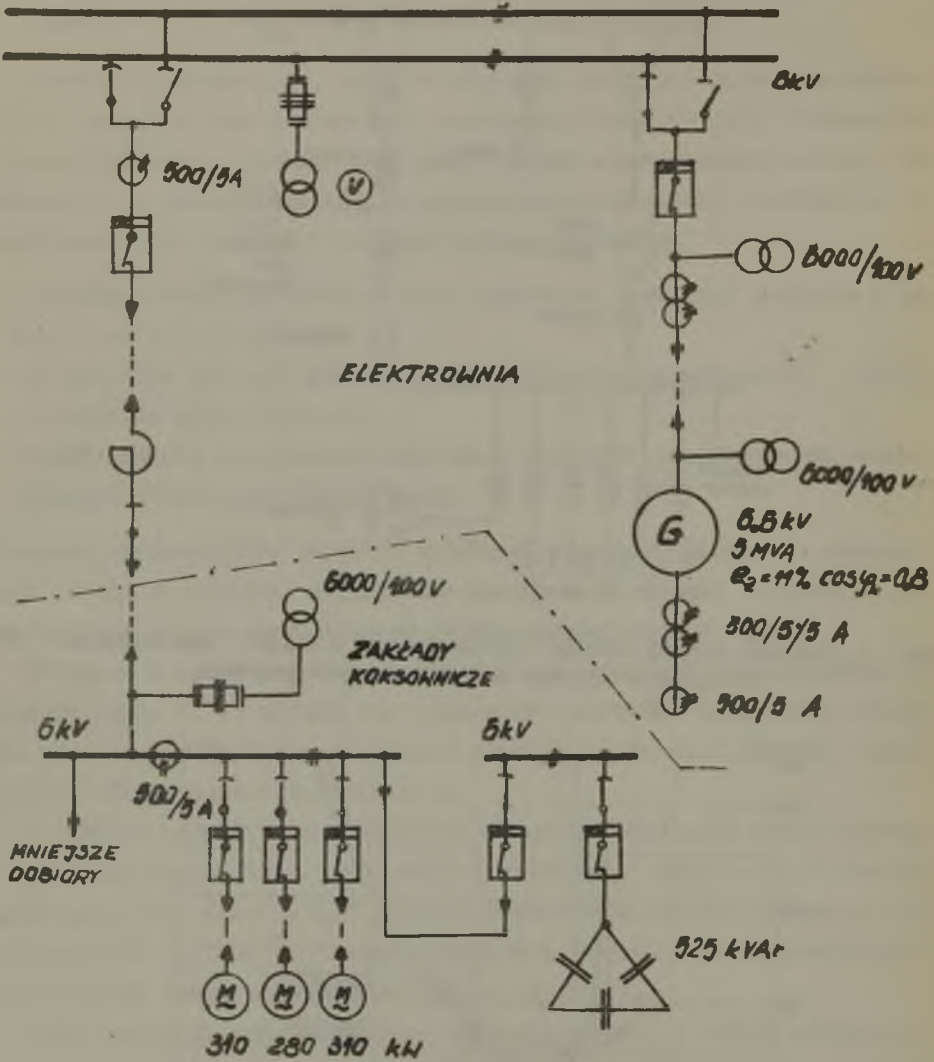
Drugi układ do badań obejmował małą elektrownię i zakład przemysłowy - Zakłady Koksownicze. W układzie tym jeden z generatorów elektrowni pracował poprzez sieć kablową na oddział młynów w koksowni. Do podstacji zasilającej oddział młynów przyłączono sekcjonowaną baterię kondensatorów. Schemat elektryczny układu podano na rysunku 6. Badania stabilności pracy odbioru, zasilanego przez podany układ, przeprowadzono w warunkach naturalnych przy $\cos \varphi = 0,70$ oraz po kompensacji do



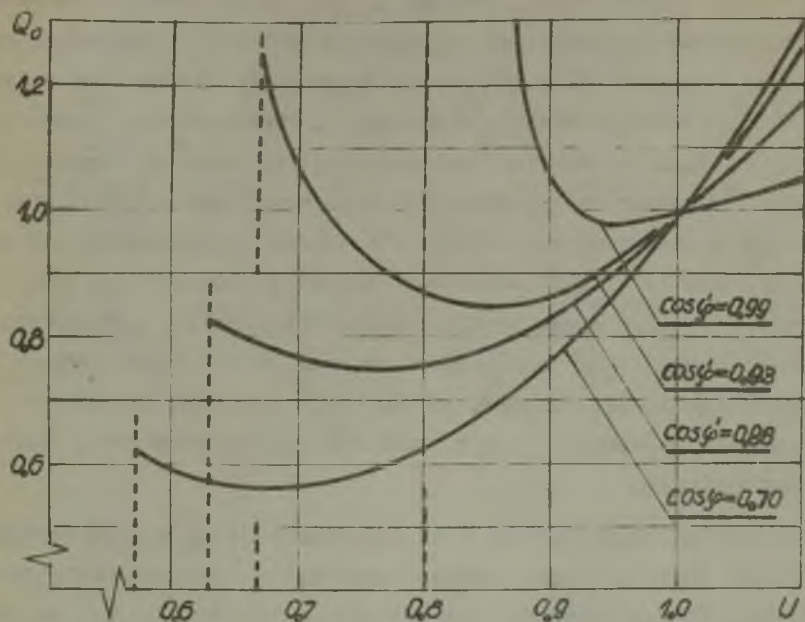
Rys. 4. Schemat ideowy układu elektroenergetycznego wydzielonego do prób, zasilającego oddział fabryki papieru



Rys. 5. Charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ oraz wartości U_{kr} dla naturalnych warunków pracy odbioru - fabryki papieru - $\cos \varphi = 0,68$ i po kompensacji do $\cos \varphi = 0,87$



Rys. 6. Schemat ideowy wydzielonego do prób układu elektroenergetycznego zasilającego oddział młynów w zakładach koksowniczych



Rys. 7. Charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ oraz wartości U_{kr} dla naturalnych warunków pracy odbioru - zakładów koksowniczych - $\cos \varphi = 0,70$ i po kompensacji do $\cos \varphi' = 0,88; 0,93; 0,98$

$\cos \varphi' = 0,88; 0,93; 0,98$. Charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ odbioru, wyznaczone do momentu osiągnięcia krytycznych wartości napięć (linie przerywane) wykreślono na rysunku 7.

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Próby pomiarowe przeprowadzone na układzie zamodelowanym i w układach wydzielonych z systemu energetycznego, potwierdziły zarówno słuszność opracowanej metodyki badania stabilności pracy odbiorów przemysłowych [2][3] jak też, od strony jakościowej, wyniki dociekań i obliczeń analitycznych. Najważniejsze poczynione obserwacje podczas badań oraz wnioski wyciągnięte na podstawie analizy wyników pomiarów są następujące:

a) kompensacja mocy biernej, prowadzona przy pomocy baterii kondensatorów, prowadziła zawsze do pogorszenia warunków stabilności pracy odbiorów - wzrostu wartości napięć krytycznych. Proces ten postępował w miarę wzrostu stopnia kompensacji. Przeprowadzone pomiary wykazały znacznie większy wpływ kompensacji na wartości napięć krytycznych niż wykonane wcześniej badania analityczne [2][3], np. kompensacja prowadzona przez odbiór w Zakładach Koksowniczych do $\cos\varphi = 0,70$ do $\cos\varphi' = 0,98$ spowodowała wzrost wartości U_{kr} o 23% U_N . (p.rys. 7). Otrzymanych wyników pomiarów nie należy jednak, zdaniem autora, oceniać jako podważających wyniki badań analitycznych. Większe różnice między wartościami U_{kr} dla warunków naturalnych i po kompensacji otrzymane w wyniku pomiarów należy tłumaczyć następującymi względami:

- znacznie większymi wartościami impedancji układów przesyłowych, w których przeprowadzono pomiary (impedancje synchroniczne generatorów), co jak wykazano w poprzednich opracowaniach [3] ma zasadniczy wpływ na wartości U_{kr} ,
- dużo wyższymi stopniami kompensacji - $\cos\varphi'$ przy próbach pomiarowych osiągał wartości 0,99 w układzie zamodelowanym i 0,98 w układzie wydzielonym z systemu podczas gdy górna wartość $\cos\varphi'$ w badaniach analitycznych [2], [3] wynosiła 0,96. Wyniki pomiarów wskazują, że przy bardzo wysokim współczynniku mocy, osiągniętym w wyniku kompensacji przy pomocy baterii kondensatorów, występuje wyraźny wzrost wartości U_{kr} ,
- badane odbiory, z uwagi na mały stopień obciążenia, znacznie różniły się od odbiorów typowych, dla których obowiązują wyniki badań analitycznych [3],
- pewną niedokładnością przy określaniu wartości U_{kr} na drodze pomiarowej.

b) procesowi utraty stabilności pracy odbioru, po przekroczeniu wartości U_{kr} , towarzyszyło samoistne obniżanie się wartości napięcia, co w konsekwencji powodowało zatrzymanie się silników. Szybkość te-

go procesu wzrastała w miarę jego postępowania. Przebieg procesu utraty stabilności w układzie zamodelowanym był znacznie szybszy niż w układach rzeczywistych, co należy tłumaczyć wielkościami momentów bezwładności maszyn,

- c) podczas przeprowadzonych badań, zarówno w układach zamodelowanych jak i rzeczywistych, można było wyraźnie zaobserwować, że napięcia krytyczne były osiągane znacznie wcześniej niż następował utyk silnika. Potwierdza to wyniki wcześniejszych rozważań teoretycznych [2], że kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$ ujawnia wcześniej graniczne warunki stabilności pracy odbiorów silnikowych niż kryterium $\frac{dM}{ds} > 0$. Pomiarzy przeprowadzone na układzie zamodelowanym pozwoliły dla jednakowych warunków pracy odbioru silnikowego (naturalnych - bez kompensacji) określić wartości U_{kr} i U_{utk} ; wynosiły one odpowiednio:

- przy obciążeniu znamionowym 0,76 i 0,63 U_N
- przy obciążeniu wynoszącym 75% obciążenia znamionowego 0,63 i 0,55 U_N .

LITERATURA

- [1] Bogucki A., Lawera E.: Wstępna analiza wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbiorów energetycznych. Sympozjum Komitetu Energetyki PAN. W-wa 18-20.XI.1966 r.
- [2] Bogucki A., Lawera E.: Stabilność pracy odbiorów przemysłowych zasilanych z sieci sztywnej, przy stosowaniu baterii kondensatorów do kompensacji równoległej mocy biernej. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. "Elektryka" 1969 z. 24.
- [3] Lawera E.: Możliwości praktycznego określania wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy energetycznych odbiorów przemysłowych. Zesz. Naukowe Pol. Śl. "Elektryka" 1970 z. 28.
- [4] Markowicz I.: Reżimy energetycznych system. Gostenergoizdat Moskwa 1963 r.

Przyjęto do druku w październiku 1970 r.

ПОПЫТКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ
ПУТЁМ ИЗМЕРЕНИИ

Р е з ю м е

В статье представлены объём и результаты измерений, целью которых является определение влияния компенсации параллельной реактивной мощности на статическую устойчивость работы промышленных потребителей энергии при снижении напряжения в приёмном узле. Компенсирующим устройством являлась конденсаторная батарея. Измерения проводились так на моделях как и на системах выделенных из государственной электроэнергетической системы.

TRIALS OF MEASURING DETERMINATION OF REACTIVE POWER PARALLEL
COMPENSATION INFLUENCE ON WORK STABILITY OF COMMERCIAL
RECEIVERS

S u m m a r y

In this article there are described the range and the results of measuring tests whose aim was to determine the reactive power parallel compensation influence on static work stability of commercial receivers while the tension in the receipt knot is reduced. As compensating installations there were applied capacitor batteries. Measurements were carried out on modeled systems as well as on specially separated systems from the country power system.

