

ANTONI BOGUCKI, EDWARD LAWERA  
Katedra Sieci i Układów  
Elektroenergetycznych

## WPLYW ZMIANY CZĘSTOTLIWOŚCI W UKŁADZIE ENERGETYCZNYM NA ZMIANY POZIOMÓW NAPIĘĆ NA SZYNACH GENERATOROWYCH

**Streszczenie.** W artykule przeprowadzono dokładną analizę współzależności zmian częstotliwości i napięcia na szynach generatorowych. Szczególną uwagę zwrócono na zależność  $U = \varphi(f)$  regulatorów napięcia, w jakie wyposażone są generatory pracujące w krajowym układzie energetycznym.

### Wstęp

W związku z istniejącą tendencją wprowadzenia w krajowym układzie energetycznym automatycznej regulacji częstotliwości i mocy czynnej, wylania się zagadnienie wnikliwej analizy parametrów układu energetycznego jako obiektu automatyzowanego, jego struktury oraz właściwości i powiązania między parametrami regulowanymi. Umiejętność interpretacji mniej lub więcej ze sobą powiązanych parametrów układu energetycznego i to zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym stanowi nieodzowny warunek prawidłowego rozwiązania samego układu automatycznej regulacji.

W aspekcie poruszonego wyżej zagadnienia bardzo istotne znaczenie ma znajomość współzależności zmian częstotliwości i napięcia i to zarówno na szynach generatorowych jak i w węzłach sieciowych układu energetycznego. To ostatnie zagadnienie zostało już dokładnie omówione [L. 1], natomiast problem współzależności tych parametrów na szynach generatorowych wymaga jeszcze przeprowadzenia bardziej wnikliwej analizy. Tym problemem zajęto się w niniejszym artykule, zwracając szczególną uwagę na zależność  $U = \varphi(f)$  automatycznych regulatorów napięcia w jakie wyposażone są generatory pracujące w krajowym układzie energetycznym. Analizę ilościową omawianego zagadnienia oparto na pomiarach dokonanych w elektrowniach podległych Zarządowi Energetycznemu Okręgu Południowego. Za umożliwienie przeprowadzenia tych pomiarów wyrażamy w tym miejscu podziękowanie Panu dyr. mgr inż. T. Dąbrowskiemu oraz pracownikom Okręgowej Dyspozycji Mocy w Katowicach<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Za współpracę przy przeprowadzaniu pomiarów i za duży wkład pracy przy opracowywaniu wyników pomiarowych wyrażamy podziękowanie Ob.Ob. mgr inż. J. Falucie oraz mgr inż. J. Górniakowi.

### 1. Współzależność zmian częstotliwości i napięcia

Współzależność zmian częstotliwości i napięcia można ogólnie przedstawić w postaci następującej funkcji

$$U = F(f, Q, P) \quad (1)$$

Różniczkując tę funkcję względem częstotliwości otrzymuje się

$$\frac{dU}{df} = \frac{\partial U}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{dQ}{df} + \frac{\partial U}{\partial P} + \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{dP}{df} \quad (2)$$

Wpływ zmian częstotliwości na pobieraną moc bierną i czynną jest podwójny [1, 2, 3]. Oprócz bezpośredniego wpływu częstotliwości na pobieraną moc, mamy ponadto wpływ pośredni, wynikający ze zmiany napięcia wywołanej zmianą częstotliwości. A zatem wielkości  $dQ/df$  i  $dP/df$  można określić następująco

$$\frac{dQ}{df} = \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \quad (3)$$

$$\frac{dP}{df} = \frac{\partial P}{\partial f} + \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \quad (4)$$

Do równości (2) wprowadzamy obecnie zależności (3) i (4)

$$\frac{dU}{df} = \frac{\partial U}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial Q} \left( \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \right) + \frac{\partial U}{\partial P} \left( \frac{\partial P}{\partial f} + \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \right)$$

Po dokonaniu szeregu prostych przekształceń otrzymujemy

$$\frac{dU}{df} \left[ 1 - \left( \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial U} \right) \right] = \frac{\partial U}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial f}$$

stąd

$$\frac{dU}{df} = \frac{\frac{\partial U}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial f}}{1 - \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial U} - \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial U}} \quad (5)$$

Bliższego omówienia wymagają wielkości wchodzące do wyprowadzonego wyżej wzoru. Jak wiadomo [2, 3], częstotliwościową charakterystykę statyczną odbioru można przy niewielkich odchyleniach częstotliwości w zakresie 45-52 Hz - aproksymować do linii prostej. Jeśli zmiany napięcia nie przekraczają zakresu (0,95+1,05)  $U_{zn}$ , to również rzeczywiste przebiegi napię-

ciowych charakterystyk statycznych odbioru można zastąpić liniami prostymi [4, 5]. Możliwość zastosowania aproksymacji liniowej pozwala na operowanie tzw. współczynnikami względnego nachylenia charakterystyk, które są określone wzorami:

- a) współczynniki względnego nachylenia częstotliwościowych charakterystyk pobieranej mocy czynnej i biernej

$$k_f = \frac{\partial P}{\partial f} \cdot \frac{f_{zn}}{P_{o_{zn}}} \quad L_f = \frac{\partial Q}{\partial f} \cdot \frac{f_{zn}}{Q_{o_{zn}}} \quad (6)$$

- b) współczynniki względnego nachylenia napięciowych charakterystyk pobieranej mocy czynnej i biernej

$$k_u = \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{U_{zn}}{P_{o_{zn}}} \quad L_u = \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{U_{zn}}{Q_{o_{zn}}} \quad (7)$$

Jak wynika z podanych wyżej zależności, współczynniki względnego nachylenia charakterystyk określają wielkość względnej zmiany pobieranej mocy wywołanej względną zmianą częstotliwości lub napięcia. Jeśli np.  $k_u = 0,6$  - to oznacza, że wzrost napięcia o 1% powyżej poziomu znamionowego wywołuje wzrost pobieranej mocy czynnej o 0,6%.

Przekształcając wyrażenia (6) i (7) otrzymujemy

$$\frac{\partial P}{\partial f} = k_f \frac{P_{o_{zn}}}{f_{zn}} \quad \frac{\partial Q}{\partial f} = L_f \frac{Q_{o_{zn}}}{f_{zn}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial U} = k_u \frac{P_{o_{zn}}}{U_{zn}} \quad \frac{\partial Q}{\partial U} = L_u \frac{Q_{o_{zn}}}{U_{zn}} \quad (9)$$

Na zmianę częstotliwości reagują również automatyczne regulatory napięcia, a ściślej ich człony pomiarowe. Zależność  $U = \varphi(f)$  regulatorów napięcia ma przebieg prostoliniowy. Współczynnik względnego nachylenia tej zależności określony jest wzorem

$$k_f = \frac{\partial U}{\partial f} \cdot \frac{f_{zn}}{U_{zn}} \quad (10)$$

stąd

$$\frac{\partial U}{\partial f} = k_f \cdot \frac{U_{zn}}{f_{zn}} \quad (11)$$

Wielkości  $\partial U / \partial Q$  i  $\partial U / \partial P$  wchodzące do zależności (5) określa się za pomocą statyzmu regulatora napięcia względem mocy biernej i odpowiednio względem mocy czynnej

$$S_q = \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{Q_{g_{zn}}}{U_{zn}} \quad (12)$$

$$S_p = \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{P_{g_{zn}}}{U_{zn}} \quad (13)$$

stąd

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = S_q \frac{U_{zn}}{Q_{g_{zn}}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial U}{\partial P} = S_p \frac{U_{zn}}{P_{g_{zn}}} \quad (15)$$

W rozpatrywanym zakresie zmian częstotliwości - zależność  $U = F(f)$  na szynach generatorowych jest prostoliniowa. Współczynnik względnego nachylenia tej zależności wyraża się wzorem

$$k = \frac{dU}{df} \cdot \frac{f_{zn}}{U_{zn}} \quad (16)$$

stąd

$$\frac{dU}{df} = k \frac{U_{zn}}{f_{zn}} \quad (17)$$

Podstawiając do zależności (5) wyrażenia określone wzorami (8), (9), (11), (14), (15) oraz (17) otrzymujemy

$$k \cdot \frac{U_{zn}}{f_{zn}} = \frac{k_r \cdot \frac{U_{zn}}{f_{zn}} + S_q \cdot \frac{U_{zn}}{Q_{g_{zn}}} \cdot L_f \frac{Q_{o_{zn}}}{f_{zn}} + S_p \cdot \frac{U_{zn}}{P_{g_{zn}}} \cdot \frac{P_{o_{zn}}}{f_{zn}} k_f}{1 - S_q \frac{U_{zn}}{Q_{g_{zn}}} \cdot L_u \frac{Q_{o_{zn}}}{U_{zn}} - S_p \frac{U_{zn}}{P_{g_{zn}}} \cdot \frac{P_{o_{zn}}}{U_{zn}} \cdot k_u}$$

- a po dokonaniu odpowiednich uproszczeń i przekształceń mamy

$$k = \frac{k_r + S_q \frac{P_{o_{zn}}}{P_{g_{zn}}} \frac{\operatorname{tg} \varphi_{o_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}} \cdot L_f + S_p \cdot \frac{P_{o_{zn}}}{P_{g_{zn}}} k_f}{1 - S_q \frac{P_{o_{zn}}}{P_{g_{zn}}} \frac{\operatorname{tg} \varphi_{o_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}} \cdot L_u + S_p \cdot \frac{P_{o_{zn}}}{P_{g_{zn}}} k_u}$$

- i ostatecznie

$$k = \frac{k_r + \frac{1}{Q} (S_q \cdot L_f \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{o_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}} + S_p \cdot k_f)}{1 - \frac{1}{Q} (S_q \cdot L_u \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{o_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}} + S_p \cdot k_u)} \quad (18)$$

w którym

$$Q = \frac{P_{g_{zn}}}{P_{o_{zn}}} - \text{współczynnik rezerwy mocy czynnej}$$

W efekcie końcowym otrzymano zatem nową postać wzoru, który pozwala w sposób bardzo prosty na przeprowadzenie analizy współzależności zmian częstotliwości i napięcia.

Jak wiadomo [4] - przeciętna wartość współczynnika względnego nachylenia częstotliwościowej charakterystyki statycznej odbioru dla zakładów przemysłowych wynosi -  $k_f = 1,1$ . Jeśli przyjąć, że  $S_p = 0,04$  to iloczyn  $S_p \cdot k_f = 0,044$  nie ma istotnego wpływu na kształtowanie się wartości współczynnika  $k$ . Jeszcze mniejszy wpływ ma iloczyn  $S_p \cdot k_u = 0,022$  - przy założeniu, że przeciętna wartość współczynnika względnego nachylenia napięciowej charakterystyki odbioru dla zakładów przemysłowych wynosi -  $k_u = 0,55$ . Pomijając zatem we wzorze (18) iloczyny  $S_p \cdot k_f$  i  $S_p \cdot k_u$  otrzymujemy uproszczony wzór w postaci

$$k = \frac{k_r + \frac{1}{Q} \cdot S_q \cdot L_f \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{o_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}}}{1 - \frac{1}{Q} \cdot S_q \cdot L_u \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{o_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}}} \quad (19)$$

W przypadku, gdy generator zasila wyłącznie odbiór oświetleniowy wartości współczynników  $k_f$ ,  $L_f$  i  $L_u$  równe są zeru, a współczynnik  $k_u > 0^x$ ) - wzór (18) przyjmie wówczas postać

$$k = \frac{k_f}{1 - \frac{1}{Q} \cdot k_u \cdot S_p} \quad (20)$$

Z powyższego wzoru wnioskujemy, że gdy  $k_f = 0$ , to wówczas współczynnik  $k = 0$  - co oznacza, że zmiana częstotliwości nie wywołuje w rozpatrywanym przypadku zmian napięcia. Jeśli natomiast  $k_f > 0$ , to w zależności od znaku wielkości  $S_p$  iloczyn  $\frac{1}{Q} \cdot k_u \cdot S_p$  - powoduje zwiększenie ( $S_p > 0$ ) lub zmniejszenie ( $S_p < 0$ ) wartości współczynnika  $k$ .

Współczynniki  $L_u$  i  $L_f$  we wzorach (18) i (19) określają względną stromość tzw. naturalnych charakterystyk statycznych pobieranej mocy biernej. Po zastosowaniu kompensacji mocy biernej odbioru, względna stromość charakterystyk wzrasta. Wartości współczynników względnego nachylenia tych charakterystyk określa się według wzorów

$$L'_u = \frac{L_u \cdot \operatorname{tg} \varphi_{0 \text{ zn}} - L_{k,u} (\operatorname{tg} \varphi_{0 \text{ zn}} - \operatorname{tg} \varphi'_{0 \text{ zn}})}{\operatorname{tg} \varphi'_{0 \text{ zn}}} = \frac{\partial Q'}{\partial U} \cdot \frac{U \text{ zn}}{Q'_{0 \text{ zn}}} \quad (21)$$

$$L'_f = \frac{L_f \cdot \operatorname{tg} \varphi_{0 \text{ zn}} - L_{k,f} (\operatorname{tg} \varphi_{0 \text{ zn}} - \operatorname{tg} \varphi'_{0 \text{ zn}})}{\operatorname{tg} \varphi'_{0 \text{ zn}}} = \frac{\partial Q'}{\partial f} \cdot \frac{f \text{ zn}}{Q'_{c \text{ zn}}} \quad (22)$$

w których

- $\operatorname{tg} \varphi_{0 \text{ zn}}$  - tangens kąta przesunięcia fazowego przed zastosowaniem kompensacji mocy biernej odbioru,
- $\operatorname{tg} \varphi'_{0 \text{ zn}}$  - tangens kąta przesunięcia fazowego po zastosowaniu kompensacji mocy biernej odbioru,
- $Q'_{0 \text{ zn}}$  - moc bierna pobierana przez odbiór po zastosowaniu kompensacji,
- $L_{k,u}$  - współczynniki względnego nachylenia charakterystyk  $Q_k = F(U)$  i odpowiednio  $Q_k = F(f)$  urządzenia kompensującego. W przypadku zastosowania baterii kondensatorów statycznych  $L_{k,u} = 2$  a  $L_{k,f} = 1$ .

<sup>x)</sup> Dla odbioru oświetleniowego współczynnik  $k_u = 1,6$

Współczynniki względnego nachylenia charakterystyk  $Q=F(U)$ ,  $P=F(U)$  i  $P=F(f)$  mają wartości dodatnie<sup>x)</sup>. Natomiast wartość współczynnika względnego nachylenia charakterystyki  $Q=F(f)$  jest przeważnie ujemna, w pewnych jednak przypadkach może mieć również wartość dodatnią. [6]. Wiadomo także, że statyzm automatycznych regulatorów napięcia może być ujemny, dodatni lub równy zero. Jeśli przyjąć, że współczynnik  $L_f < 0$  oraz  $S_q < 0$ , to wzór (19) z uwzględnieniem znaków przyjmie postać

$$k = \frac{k_r + \frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_f \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}}{1 + \frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_u \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}} \quad (23)$$

- a przy przyjęciu  $L_f < 0$  i  $S_q > 0$

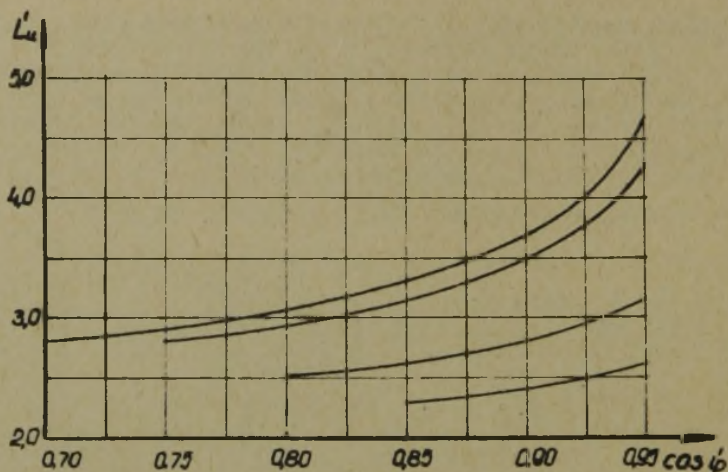
$$k = \frac{k_r - \frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_f \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}}{1 - \frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_u \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}} \quad (24)$$

Jeśli automatyczny regulator napięcia nie reaguje na zmiany częstotliwości, to współczynnik  $k_r = 0$  i wtedy wzory (23) i (24) mają postać

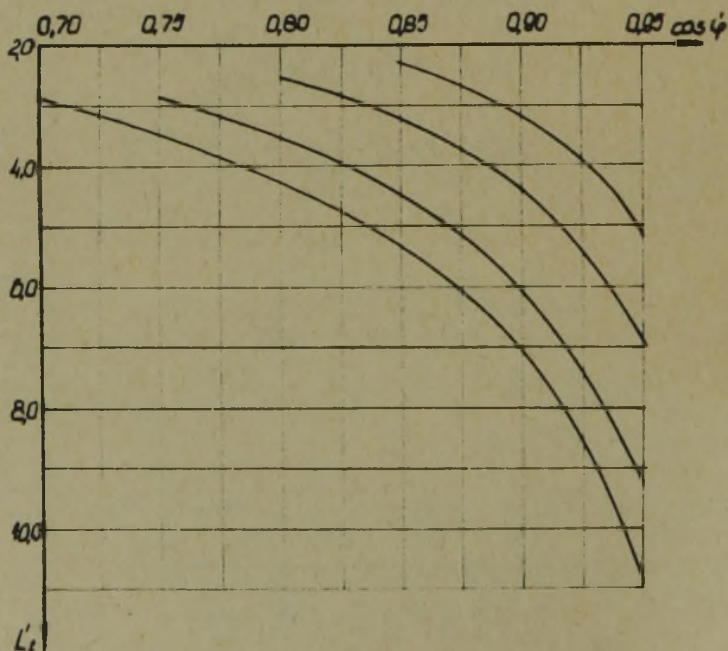
$$k = \frac{\frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_f \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}}{1 + \frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_u \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}} \quad (25)$$

$$k = \frac{-\frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_f \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}}{1 - \frac{1}{\varrho} \cdot S_q \cdot L_u \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0zn}}{\operatorname{tg} \varphi g_{zn}}} \quad (26)$$

<sup>x)</sup> Z wyjątkiem współczynnika  $k_f$  dla odbioru oświetleniowego. Dla tego przykładu  $k_f = 0$ .

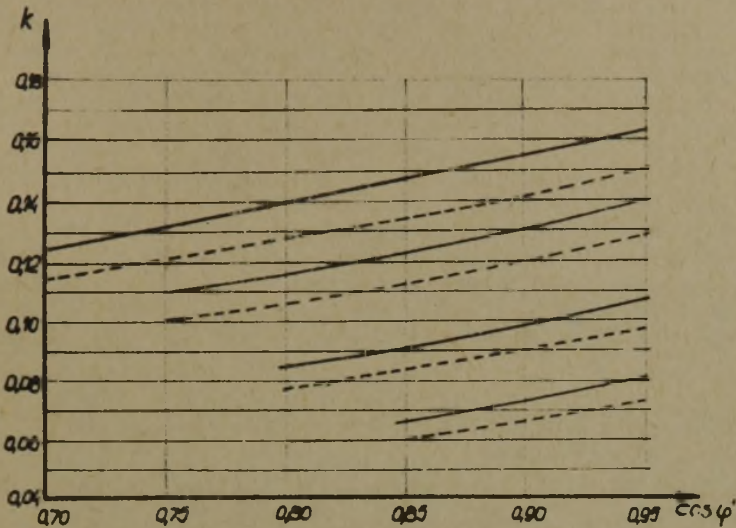


Rys. 1. Wykresy zależności  $L_u' = F(\cos \varphi')$ . Wartość odciętej punktu początkowej każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości

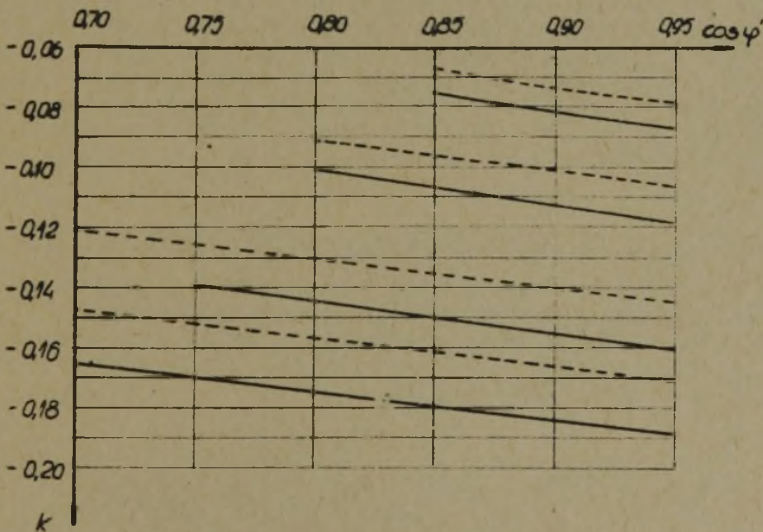


Rys. 2. Wykresy zależności  $L_r' = F(\cos \varphi')$ . Wartość odciętej punktu początkowej każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości





Rys. 3. Wykresy zależności  $k = F(\cos \varphi')$  przy założeniu, że współczynnik  $k_r = 0$ , statyzm  $S_q = -0,05$ , znamionowy współczynnik mocy generatora  $\cos \varphi_{gzn} = 0,70$  oraz współczynnik rezerwy  $q = 1,0$  (linie ciągłe) i  $q = 1,1$  (linie przerywane)



Rys. 4. Wykresy zależności  $k = F(\cos \varphi')$  przy założeniu, że  $k_r = 0$ ,  $S_q = +0,05$ ,  $\cos \varphi_{gzn} = 0,70$  oraz  $q = 1,0$  (linie ciągłe) i  $q = 1,1$  (linie przerywane)

Ze wzoru (25) wynika, że zmiana poboru mocy biernej wywołana zmianą napięcia wpływa na zmniejszenie wartości współczynnika  $k$ . Natomiast ze wzoru (26) wnioskujemy, że ta sama zmiana powoduje wzrost bezwzględnej wartości współczynnika  $k$ . Warto dodać, że w pierwszym przypadku  $k > 0$  - co oznacza, że wzrost częstotliwości wywołuje wzrost napięcia. W drugim zaś przypadku  $k < 0$ , czyli wzrost częstotliwości powoduje obniżenie napięcia. W podobny sposób można wysnuć odpowiednie wnioski z analizy wzorów (23) i (24).

Dla przeprowadzenia ilościowej analizy wzorów (25) i (26) wykorzystając można przeciętne wartości współczynników względnego nachylenia charakterystyk  $Q = F(f)$  i  $Q = F(U)$  odbioru dla zakładów przemysłowych [3, 5]. Na rys. 1 i 2 wykreślono krzywe podające zależność wartości współczynników  $L'_u$  i  $L'_f$  od stopnia kompensacji mocy biernej odbioru. Wartość odciętej punktu początkowego każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości ( $U_{zn}$ ,  $f_{zn}$ ). Dla obliczenia wartości współczynników  $L'_u$  i  $L'_f$  wykorzystano wzory (21) i (22) przyjmując, że do kompensacji mocy biernej odbioru zastosowano baterię kondensatorów statycznych.

Wykorzystując wzory (25) i (26) oraz wykresy podane na rys. 1 i 2 wykreślono na rys. 3 i 4 krzywe określające zależność współczynnika  $k$  od stopnia kompensacji mocy biernej odbioru. Ponieważ w większości przypadków statyzm automatycznych regulatorów napięcia - w jakie wyposażone są generatory w krajowym układzie energetycznym - wynosi  $S_q = 0,05$ , dlatego ograniczono się do podania zależności tylko dla tej wielkości statyzmu. Krzywe te stanowią pewną ilustrację wielkości możliwych zmian napięcia wywołanych zmianą częstotliwości dla określonych warunków pracy generatora przy założeniu, że sam automatyczny regulator napięcia nie reaguje bezpośrednio na zmiany częstotliwości ( $k_f = 0$ ) - jest to regulator o tzw. czystej charakterystyce.

## 2. Zależność $U = \varphi(f)$ automatycznych regulatorów napięcia

Zależność  $U = \varphi(f)$  automatycznych regulatorów napięcia ma przebieg prostoliniowy. Współczynnik względnego nachylenia tej zależności został już w poprzednim ustępie określony wzorem (10).

Korzystając ze wzorów (2), (11), (14), (15) oraz (17) można wyprowadzić następującą zależność

$$k = k_f + \frac{1}{Q} (S_q \cdot L_{f,u} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_{0_{zn}}}{\operatorname{tg} \varphi_{g_{zn}}} + S_p \cdot k_{f,u}) \quad (27)$$

stąd

$$k_r = k - \frac{1}{Q} (S_q \cdot I_{f,u} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_0}{\operatorname{tg} \varphi_{\Sigma n}} + S_p \cdot k_{f,u}) \quad (28)$$

w którym

$I_{f,u}$ ,  $k_{f,u}$  - współczynniki względnego nachylenia charakterystyk  $Q = F(f,U)$  i  $P = F(f,U)$ , uwzględniających wpływ zmiany napięcia na pobieraną moc (por. wzory (3) i (4)).

Na podstawie powyższego wzoru można wyznaczyć wartość współczynnika  $k_r$ , jeśli znane są wartości współczynników  $k$ ,  $I_{f,u}$ ,  $k_{f,u}$  oraz statyzmu  $S_q$  i  $S_p$ .

Dla określenia wartości współczynników  $k_r$  dla różnych typów regulatorów napięcia - w jakie wyposażone są generatory pracujące w krajowym układzie energetycznym - przeprowadzono odpowiednie pomiary w elektrowniach podległych Zarządowi Energetycznemu Okręgu Południowego. Podczas dokonywania pomiarów poszczególne generatory były wyodrębnione z pracy równoległej w układzie. Częstotliwość zmieniano co 1 Hz w zakresie 48-52 Hz, odczytując jednocześnie wartość pobieranej mocy czynnej i biernej oraz napięcia. Czas trwania jednego cyklu pomiarowego wynosił ok. 20 minut. Dla uzyskania możliwości sprawdzenia otrzymanych wyników - pomiary takie powtarzano 3-krotnie. W tym samym celu korzystano równocześnie z przyrządów rejestrujących napięcie, częstotliwość oraz pobieraną moc czynną i bierną. W ten sposób wyznaczono w pierw przebiegi zależności  $Q = F(f,U)$ ,  $P = F(f,U)$  oraz  $U = F(f)$ , a następnie określono wartości współczynników względnego nachylenia tych charakterystyk ( $I_{f,u}$ ,  $k_{f,u}$  i  $k$ ) oraz wykorzystując wzór (28) obliczono wartości współczynników  $k_r$ . W tabelicy 1 zestawiono wartości współczynników  $k_r$  dla różnych najczęściej stosowanych typów automatycznych regulatorów napięcia.

Z tabelicy 1 wynika, że wartości współczynników  $k_r$  poszczególnych typów regulatorów napięcia dość znacznie się różnią. Obserwujemy wyraźną różnicę w wartościach współczynników  $k_r$  starszych i nowoczesnych regulatorów napięcia. Wartości współczynników  $k_r$  tych pierwszych (poz. 1 i 2) mieszczą się w zakresie 0,5-0,7, natomiast zakres ten dla nowoczesnych regulatorów (poz. 3 i 5) wynosi 0,9+1,0. Wyjątek stanowi tutaj jedynie regulator produkcji firmy Siemens-Schuckert (poz. 4). Jeżeli przyjmiemy, że o wartości wypadkowego współczynnika  $k$  regulatora decyduje głównie wartość  $k_r$ , to podane wyżej stwierdzenia odpowiadają nowoczesnym tendencjom budowy regulatorów o możliwie dużych współczynnikach  $k$ . Dla regulatorów posiadających duże wartości wypadkowych współczynników  $k$  względnym zmia-

nom częstotliwości towarzyszą znaczne względne zmiany napięcia, co jest pomocne przy opanowaniu zjawisk przejściowych prowadzących do naruszenia równowagi w systemie.

Tablica 1

Zestawienie wartości współczynnika  $k_T$   
dla różnych typów automatycznych regulatorów napięcia

Lp.	Typ regulatora	Wartość współczynnika $k_T$
1	BBCK - 1100 a	$\approx 0,70$
2	BBC - AB4/1	$\approx 0,50$
3	EPA - 102	$\approx 1,0$
4	Magnetyczno-transduktorowy, prod. Siemens-Schuckert	$\approx 0,00$
5	Transduktorowy - prod. Kat. Maszyn Elektr. Polit. Śląskiej	$\approx 0,9$

### 3. Zależność $U=F(f)$ na szynach generatorowych

Ze wzoru (18) wynika, że wielkość zmiany napięcia wywołana zmianą częstotliwości zależy od szeregu czynników; wartości współczynnika  $k_T$ , wielkości i charakteru odbioru, parametrów generatora oraz od wielkości i znaku statyzmu regulatora. Z porównania wykresów zależności  $k = F(\cos\varphi)$  - rys. 3 i 4 oraz zestawienia wartości współczynników  $k_T$  (tabl. 1) możemy nato-

miast wnioskować, że wartości współczynników  $k$  zależą jednak w głównej mierze od wielkości współczynników  $k_T$  regulatora na-

pnięcia. Wniosek ten potwierdzają również pomiary wartości współczynnika  $k$  przeprowadzone w krajowym układzie energetycznym. Wartości tych współczynników zestawiono w tablicy 2.

Jak wynika z tablicy 2, rozrzut wartości współczynników  $k$  jest dość znaczny i spowodowany przede wszystkim znacznym rozrzutem wartości współczynników  $k_T$  (por. tabl. 1). W dotychczasowych publikacjach [1,9] omawiających współzależność zmian

częstotliwości i napięcia zwykle się zakłada, że  $k = k_T$ . Z

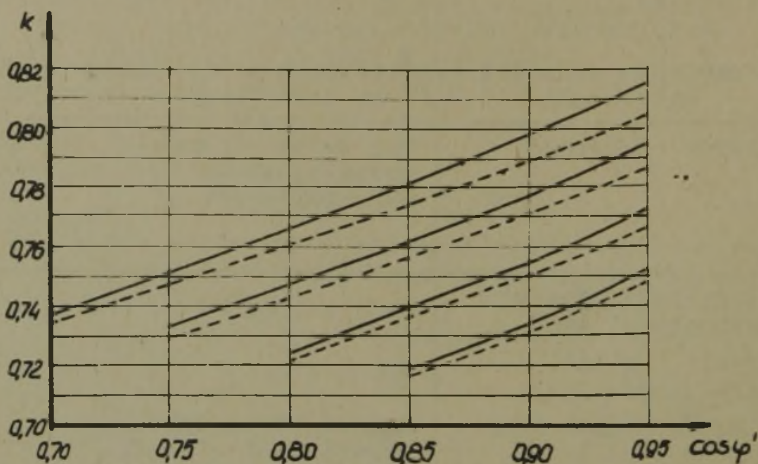
przeprowadzonych wyżej rozważań wynika, że takie założenie może być w pewnych przypadkach niesłuszne. Zwłaszcza wówczas, gdy wartość współczynnika  $k_T$  jest mała np. 0.15 i wtedy wartość 2 członu wzoru (18) może być tego samego rzędu, a nawet większa od wartości współczynnika  $k_T$  (rys. 3, 4).

Tablica 2

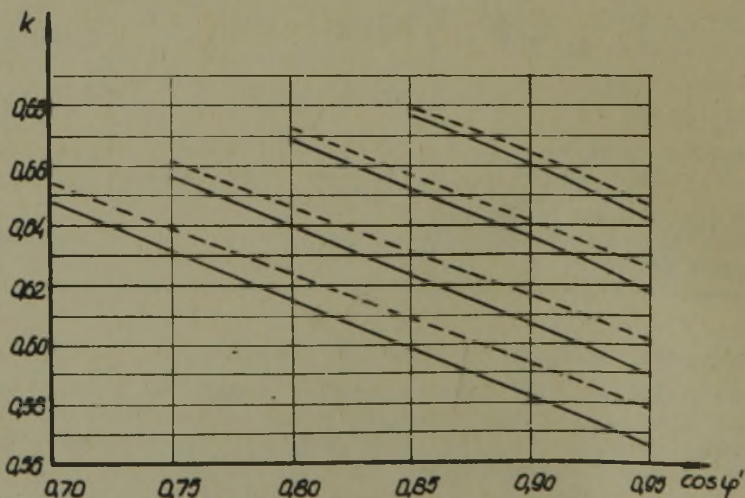
Zestawienie wartości współczynników względnego nachylenia zależności  $U = F(f)$  na szynach generatorowych

Lp.	Nazwa elektrowni	Typ zainstalowanego automatycznego regul. napięcia	Wartość współczynnika $k = \frac{dU}{df} \cdot \frac{f_{zn}}{U_{zn}}$
1	Elektr. Szombierki turbozespół Nr 4	BBCK - 1100 a	0,77
2	Elektr. Zabrze turbozespół Nr 6	BBC - AB4/1	0,60
3	Elektr. Blachownia turbozespół Nr 2	Magnet.-transdukt. prod.Siemens-Schuck.	0,10
4	Elektr. Jaworzno II turbozespół Nr 2	EPA - 102	1,24
5	Elektr. Halemba turbozespół Nr 1	Transdukt.prod. Kat.Masz.Elekt. Polit.Sl.	0,95
6	Elektr. Szczecin turbozespół Nr 5, 6	BBC - AB2	0,82
7	Elektr. Poznań turbozespół Nr 1, 2	BBC - A2/1	0,80
8	Elektr. Gorzów Wlkp turbozespół Nr 1,2,3	YRVBE	0,65
9	Elektr. Otmuchów turbozespół Nr 1,2	BBC AB2/1	0,65
10	Elektr. Dychów turbozespół Nr 3	korektory elektronowe prod.radz.	1,10
11	Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ukł. francuskim [9]	-	0,65-0,75

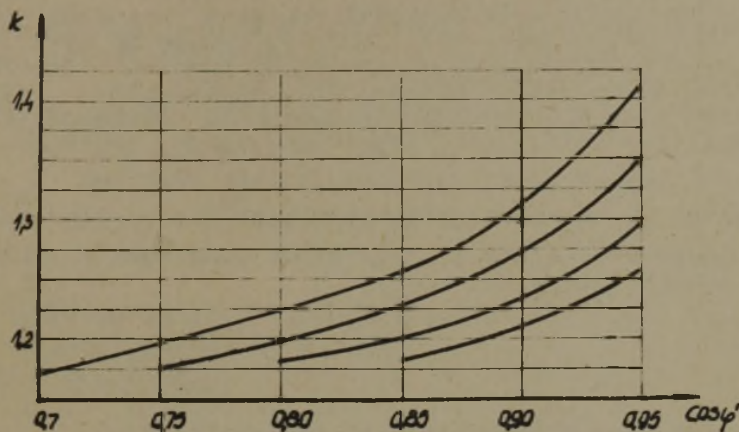
W przypadku większych wartości współczynnika  $k_r$ , wpływ tego drugiego członu (wzór 18) na kształtowanie się wartości współczynnika  $k$  będzie oczywiście mniejszy. Ilustrują to stwierdzenie podane na rys. 5, 6, 7 i 8 wykresy zależności  $k=F(\cos\varphi)$  - wyznaczone dla regulatorów o  $k_r = 0,7$  oraz  $k_r = 1,2$ . Wykresy te sporządzono w sposób analogiczny i dla takich samych wartości  $S_q$  jak wykresy na rys. 3 i 4. Wykresy podane na rys. 7, 8 ( $k_r = 1,2$ ) są sporządzone tylko dla wartości współczynnika re-



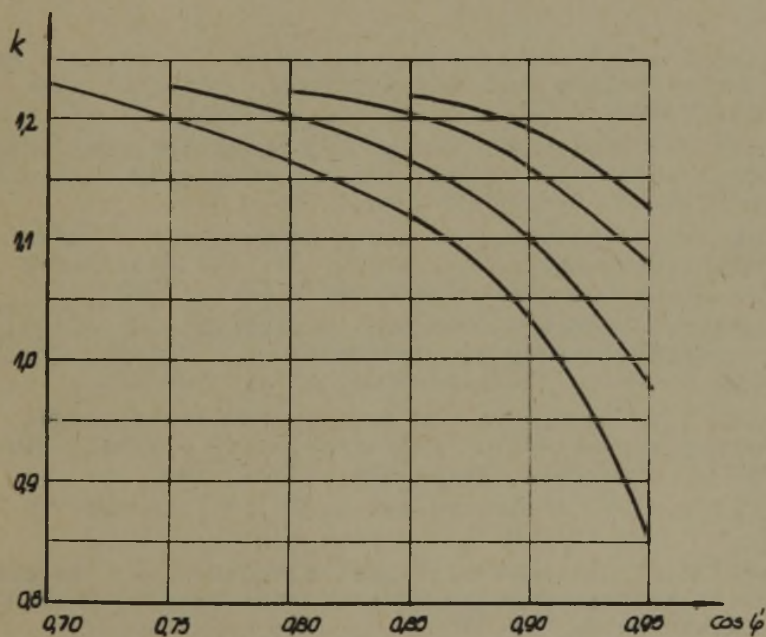
Rys. 5. Wykresy zależności  $k = F(\cos \varphi')$  przy założeniu, że  $k_T = 0,70$ ,  $S_q = -0,05$ ,  $\cos \varphi_{gzn} = 0,70$  oraz  $q = 1,0$  i  $q = 1,1$  (linie przerywane)



Rys. 6. Wykresy zależności  $k = F(\cos \varphi')$  przy założeniu, że  $k_T = 0,70$ ,  $S_q = +0,05$ ,  $\cos \varphi_{gzn} = 0,70$  oraz  $q = 1,0$  i  $q = 1,1$  (linie przerywane)



Rys. 7. Wykresy zależności  $k = F(\cos \varphi')$  przy założeniu, że współczynnik  $k_r = 1,2$ , statyzm  $S_q = -0,05$ , znamionowy współczynnik mocy generatora  $\cos \varphi_{gzn} = 0,70$  oraz współczynnik rezerwy  $q = 1,0$ .



Rys. 8. Wykresy zależności  $k = F(\cos \varphi')$  przy założeniu, że współczynnik  $k_r = 1,2$ , statyzm  $S_q = +0,05$ , znamionowy współczynnik mocy generatora  $\cos \varphi_{gzn} = 0,70$  oraz współczynnik rezerwy  $q = 1,0$ .

zerwy mocy czynnej  $\rho = 1$ , ponieważ zmiana  $k$  wywołana przyjęciem  $\rho = 1,1$  jest bardzo mała. Wykresy podane na rys. 3-8 stanowią ilustrację zmian częstotliwości na szynach generatorowych wywołanych zmianami napięcia dla określonych warunków pracy generatora, dla regulatorów napięcia, posiadających różne wartości współczynnika  $k_r$  i pracujących ze statyzmem  $S_q = \pm 0,05$ . Rozpatrywane wartości zarówno statyzmu  $S_q$  jak i współczynnika  $k_r$  są najczęściej spotykane dla regulatorów napięcia w jakie wyposażone są generatory pracujące w krajowym systemie energetycznym.

Rękopis złożono w Redakcji w sierpniu 1964 r.

#### LITERATURA

- [1] Bogucki A.: Wpływ zmiany częstotliwości w układzie energetycznym na zmiany poziomów napięcia w węzłach sieciowych. Zeszyty Naukowe Polit. Śląskiej, Elektryka Z. 17, 1964.
- [2] Bogucki A., Wójcik M.: Napięciowe charakterystyki statyczne pobieranej mocy czynnej dla typowych grup odbiorów energetycznych. Energetyka Nr 7, 1962.
- [3] Bogucki A., Wójcik M.: Równania naturalnych statycznych charakterystyk napięciowych mocy biernej pobieranej przez typowe grupy odbiorów - Energetyka Nr 2, 1962 r.
- [4] Bogucki A., Wójcik M.: Równania częstotliwościowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy czynnej dla typowych grup odbiorów. Energetyka, Nr 8, 1962.
- [5] Bogucki A., Wójcik M.: Równania częstotliwościowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy biernej dla typowych grup odbiorów. Energetyka, Nr 5, 1963.
- [6] Jasicki Z.: Sieci elektryczne część III, Skrypt PWN Łódź 1956.
- [7] Paszek Wł.: Podstawowe własności nowoczesnych regulatorów napięcia generatorów synchronicznych. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. Elektryka Z. 18, 1958.
- [8] Skoczyński Z.: Prace prowadzone w Polsce na tle ogólnych zagadnień regulacji mocy wymiennej i częstotliwości - ref. na Konf. Naukowej, Warszawa 1961.



- [9] Faluta J., Górniak J.: Analiza zależności  $U = \varphi(f)$  automatycznych regulatorów napięcia, praca dypl.konsul. przez dr A. Boguckiego Bibl. Kat. Sieci i Układów Pol. Śl.
- [10] Gaden: Determinations experimentale de l'influence de la fréquence sur la puissance absorbée par un réseau de consommations. Bull. Soc. Franc. 1947.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЕ НА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ  
НА ГЕНЕРАТОРНЫХ ШИНАХ

Резюме

В статье проведено точной анализ взаимозависимости изменений частоты и напряжения на генераторных шинах. Особое внимание обращено на зависимость  $U = \varphi(f)$  регуляторов напряжения, которыми снабжены генераторы, работающие в польской энергетической системе.

INFLUENCE OF FREQUENCY CHANGE IN ENERGETIC  
SYSTEM ON VOLTAGE LEVELS CHANGES AT GENERATOR BUS-BARS

Summary

The exact analysis of relation between frequency and voltage changes at generator bus-bars has been carried out in the article. The special stress was put on  $U = \varphi(f)$  relation for voltage regulators working in Polish energetic system.