ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 98 Elektryka z. 17 1964

ANTONI BOGUCKI
Katedra Sieci i Układów Elektroenerg.

WPŁYW ZMIANY CZĘSTOTLIWOŚCI W UKŁADZIE ENERGETYCZNYM NA ZMIANY POZIOMÓW NAPIĘĆ W WĘZŁACH SIECIOWYCH

Streszczenie. Zmiana częstotliwości w układzie energetycznym wywołuje zmianę poziomów napięć w węzłach sieciowych. W artykule przeprowadzono dokładną analizę tego problemu w oparciu o wyprowadzone przez autora wzory. W rozważaniach uwzględniono częstotliwości i napięciowe charakterystyki statyczne odbioru, zmianę parametrów linii przesyłowych i transformatorów oraz zależność U = F(f) regulatorów napięcia.

Wstęp

Zagadnienie wpływu zmiany częstotliwości na zmianę poziomów napięć w węzłach sieciowych jest w literaturze technicznej - zarówno krajowej jak i zagranicznej - potraktowane marginesowo i ogólne zdanie sprowadza się do stwierdzenia, że wpływ taki istnieje. Brak jest natomiast publikacji poświęcowej analizie tego zagadnienia. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy doszukiwać się nie tylko w tym, że problem jest bardzo skomplikowany, ale również i w braku odpowiedniego materiału pomiarowego oraz metody, która dawałaby możliwość przeprowadzenia prostej i jasnej analizy omawianego problemu.

Zmiana częstotliwości w układzie energetycznym wywołuje zmianę pobieranej mocy czynnej i biernej, zgodnie z częstotliwościowymi charakterystykami odbioru oraz wpływa na wielkości oporności wzdłużnych i poprzecznych poszczególnych elementów tego układu. Zmiany te wpływają na wielkości spadków napięcia, a więc i na zmianę poziomów napięć w węzłach sieciowych. Zmiana napięcia w węzłach wywołuje z kolei zmianę pobieranej mocy czynnej i biernej według

napięciowych charakterystyk odbioru - co wpływa również na wielkości spadków napięcia występujących na poszczególnych elementach układu. Ponadto na zmianę częstotliwości reagują w większości przypadków człony pomiarowe automatycznych regulatorów napięcia - w jakie wyposażone są generatory i kompensatory - w wyniku czego otrzymujemy również pewną zależność $U = F(f)$ regulatora.

Widzimy zatem, że zmiana częstotliwości w układzie wywołuje kilka wzajemnie powiązanych i nakładających się procesów. Dla łatwiejszego przeprowadzenia analizy tych procesów wprowadzimy na wstępie naszych rozważań pewne uproszczenia, polegające na wyodrębnieniu poszczególnych procesów i założeniu ich wzajemnej niezależności. Taka idealizacja rzeczywistych procesów zachodzących w układzie okazała się całkowicie usprawiedliwiona, gdyż wnioski wynikające z przyjętego sposobu analizy nie okazały się fałszywe w konfrontacji z wnioskami, wynikającymi z dokonanych przez autora pomiarów w rzeczywistym układzie.

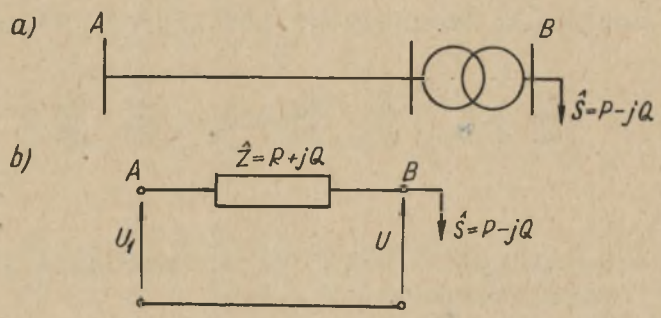
Metoda użyta przy rozpatrywaniu omawianego problemu polega na odpowiedniej analizie funkcjonalnego związku między tzw. współczynnikami względnego nachylenia napięciowych oraz częstotliwościowych charakterystyk statycznych odbioru. Analizę ilościową przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste charakterystyki statyczne $P = F(U)$, $Q = F(U)$, $P = F(f)$ i $Q = F(f)$ wyznaczone na podstawie kilkuset pomiarów dokonanych w krajowym układzie energetycznym.

Wpływ zmiany napięcia na spadki napięcia występujące w układzie przesyłowym

Badanie wpływu zmiany napięcia na spadki napięcia ograniczymy do prostego układu przesyłowego - składającego się z linii przesyłowej i zwykłego transformatora obniżającego. Na rys.1 przedstawiono prosty układ przesyłowy oraz jego schemat zastępczy. W schemacie zastępczym układu uwzględniono jedynie wzdłużną oporność linii $\hat{Z}_L = R_L + jX_L$ oraz transformatora $\hat{Z}_T = R_T + j X_T$. W pierwszej fazie naszych rozważań - dla ich uproszczenia - pominiemy zarówno przewodność pozorną linii $\hat{Y}_L = G_L + j B_L$, jak i transformatora $\hat{Y}_T = G_T - j B_T$.

W wyniku przyjętych założeń schemat zastępczy układu zredukował się do jednej wzdłużnej oporności zastępczej $\hat{Z} = R + j X$. Zakładamy, że na końcu układu odbieramy moc $\hat{S} = P - j Q$ przy napięciu U. Wówczas spadek napięcia może być określony według wzoru:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \tag{1}$$



Rys.1
a) układ przesyłowy, b) uproszczony schemat zastępczy układu przesyłowego

Uprzednio założyliśmy, że transformator obniżający jest zwykłym transformatorem mocy pracującym na pewnej ustalonej przekładni. Wobec tego podniesienie poziomu napięcia w układzie wywoła jednocześnie wzrost napięcia na zaciskach wtórnych transformatora obniżającego i tym samym wzrost poboru mocy czynnej i biernej według napięciowych charakterystyk statycznych odbioru. Zadaniem naszym jest zbadanie wpływu zmiany poziomu napięcia na spadek napięcia, występujący w rozpatrywanym układzie przesyłowym. Do naszych rozważań wprowadzamy tzw. współczynnik względnego nachylenia zależności $\Delta U = F(U)$. Współczynnik ten możemy w ogólnej postaci określić wzorem

$$\alpha_u = \frac{d\,\Delta U}{dU} \cdot \frac{U}{\Delta U} \tag{2}$$

W celu znalezienia funkcjonalnego związku między współczynnikiem α_u a współczynnikami względnego nachylenia napięciowych charakterystyk P = F(U) oraz Q = F(U) - szukamy pochodnej zależności $\Delta U = F(U)$ względem napięcia

$$\frac{d\,\Delta U}{dU} = \frac{R}{U} \cdot \frac{dP}{dU} + \frac{X}{U} \cdot \frac{dQ}{dU} - \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U^2} \cdot \frac{dU}{dU} \qquad (3)$$

Do równości (3) wprowadzamy następujące zależności

$$\frac{dP}{dU} = K_u \cdot \frac{P}{U}, \quad \frac{dQ}{dU} = L_u \cdot \frac{Q}{U}, \quad \frac{dU}{dU} = 1$$

gdzie:

K_u - współczynnik względnego nachylenia napięciowej charakterystyki P = F(U),

L_u - współczynnik względnego nachylenia napięciowej charakterystyki Q = F(U).

Po wprowadzeniu podanych wyżej zależności oraz po dokonaniu szeregu przekształceń otrzymujemy

$$\frac{d\,\Delta U}{dU} = \frac{\Delta U}{U} \left(\frac{K_u + \frac{X}{R} L_u \, tg\varphi}{1 + \frac{X}{R} tg\varphi} - 1 \right)$$

a stąd

$$\alpha_u = \left(\frac{K_u + \frac{X}{R} L_u \, tg\varphi}{1 + \frac{X}{R} tg\varphi} - 1 \right) = \frac{d\,\Delta U}{dU} \cdot \frac{U}{\Delta U} \text{ x)} \qquad (4)$$

x) Jeśli np. $\alpha_u = 0{,}8$ - to oznacza, że wzrost napięcia o 1% wywołuje wzrost spadku napięcia o 0,8%.

Po poprawie naturalnego współczynnika mocy do pewnej określonej wartości $\cos\varphi'$ - zmienia się nie tylko bezwzględna wartość spadku napięcia z ΔU na $\Delta U'$, lecz zmienia się również wartość współczynnika α_u na α'_u oraz L_u na L'_u. Po kompensacji mocy biernej wzór (4) przyjmie zatem postać

$$\alpha'_u = \left(\frac{K_u + \frac{X}{R} L'_u \, tg\varphi'}{1 + \frac{X}{R} tg\varphi'} - 1\right) = \frac{d\Delta U'}{dU} \cdot \frac{U}{\Delta U'} \qquad (5)$$

gdzie

$$L'_u = \frac{L_u \, tg\varphi - 2(tg\varphi - tg\varphi')}{tg\varphi'} = \frac{dQ'}{dU} \cdot \frac{U}{Q'} \qquad (6)$$

L'_u - współczynnik względnego nachylenia charakterystyki $Q = F(U)$,

$tg\varphi$ - tangens kąta przesunięcia fazowego przed kompensacją,

$tg\varphi'$ - tangens kąta przesunięcia fazowego po kompensacji,

Q' - moc bierna pobierana przez odbiór po kompensacji.

Analizę wpływu zmiany poziomu napięcia na spadek napięcia, występujący w rozpatrywanym układzie przesyłowym, przeprowadzimy w oparciu o wzory (4) i (5) oraz o zestawione w tablicy 1 wartości współczynników względnego nachylenia napięciowych charakterystyk $P = F(U)$ i $Q = F(U)$ dla zakładów przesyłowych. Podane wartości współczynników K_u i L_u oraz współczynników mocy $\cos\varphi$ - odniesione są do napięcia znamionowego.

Z wzoru (4) wynika, że przy tym samym poziomie napięcia, wartość współczynnika α_u jest zależna od wartości współczynników K_u i L_u oraz wartości tangensa kąta przesunięcia fazowego i stosunku X/R. Na rys.2, 3 i 4 wykreślono zależności $\alpha_u = F(X/R)$ - krzywe 1, wyznaczone dla 3 różnych wartości naturalnych współczynników mocy ($\cos\varphi_{zn}$ = 0,85, 0,70, 0,60) i odpowiadających im współ-

Tablica 1

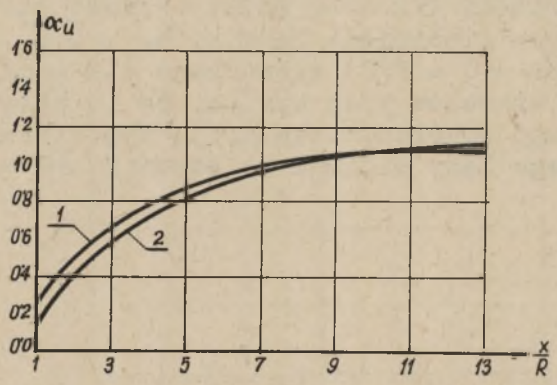
Zestawienie wartości współczynników K_u i L_u dla zakładów przemysłowych

Wartości współczynników $K_u = \frac{dP}{dU} \cdot \frac{U_{zn}}{P_{zn}}$		
Okres		
Przedpołudniowy	wieczorny	nocny
0,55	0,6	

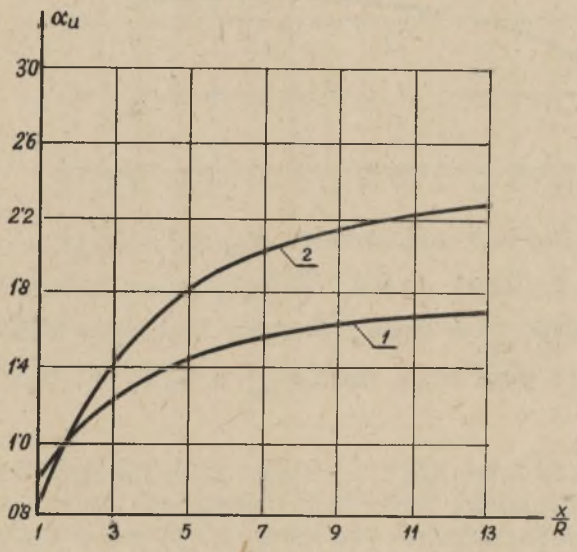
Wartości współczynników $L_u = \frac{dQ}{dU} \cdot \frac{U_{zn}}{Q_{zn}}$	
Dla $\cos\varphi_{zn} \geqslant 0,85$	2,3
dla $0,80 \leqslant \cos\varphi_{zn} < 0,85$	2,5
dla $0,70 \leqslant \cos\varphi_{zn} < 0,80$	2,8
dla $\cos\varphi_{zn} < 0,70$	3,1

czynników L_u (tablica 1). Z podanych wykresów wynika, że przy niższych wartościach stosunku X/R zależność $\alpha_u = F(X/R)$ ma przebieg stromy. Natomiast dla $X/R \geqslant 6$ - przebieg omawianej zależności jest coraz bardziej łagodny. Z porównania wymienionych wykresów wnioskujemy również, że im jest niższa wartość naturalnego współczynnika mocy, tym jest wyższa wartość współczynnika α_u - przy tym samym stosunku X/R.

Na podstawie przeprowadzonych wyżej rozważań oraz rys. 2, 3 i 4 możemy ogólnie stwierdzić, że przy niskich wartościach stosunku X/R przebiegi zależności $\Delta U = F(U)$ będą płaskie. W miarę wzrostu stosunku X/R przebiegi zależności $\Delta U = F(U)$ będą coraz bardziej strome, ale po

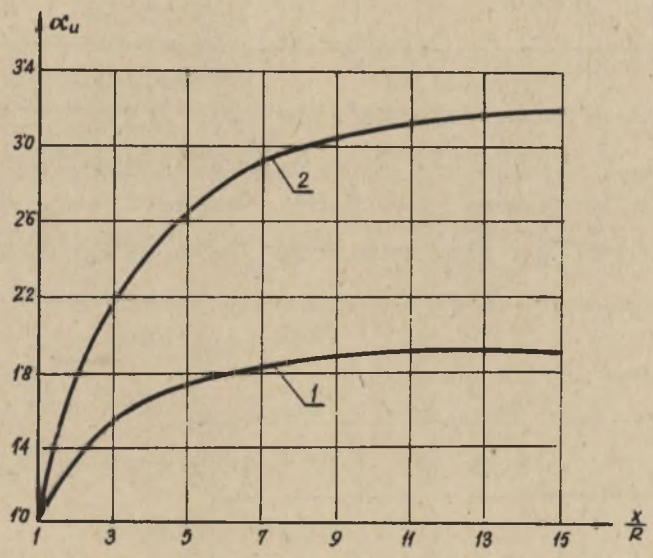


Rys.2. Wykres zależności $\alpha_u = F(X/R)$
Krzywa 1 - $\alpha_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0{,}55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0{,}85$. Krzywa 2 - $\alpha'_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0{,}55$, po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0{,}85$ do 0,90



Rys.3. Wykres zależności $\alpha_u = F(X/R)$
Krzywa 1 - $\alpha_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0{,}55$ oraz naturalnego współczynnika $\cos\varphi_{zn} = 0{,}70$. Krzywa 2 - $\alpha'_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0{,}55$, po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0{,}70$ do 0,90

przekroczeniu wartości X/R = 6, dalszy wzrost stromości jest już stosunkowo niewielki. Na rys. 5, 6 i 8 podano wykresy zależności $\Delta U = F(U)$ wyznaczone dla różnych stosunków X/R. Z wykresów tych wynika, że im wyższa jest wartość naturalnego współczynnika mocy, tym bliżej napięcia znamionowego leży minimum zależności $\Delta U = F(U)$.



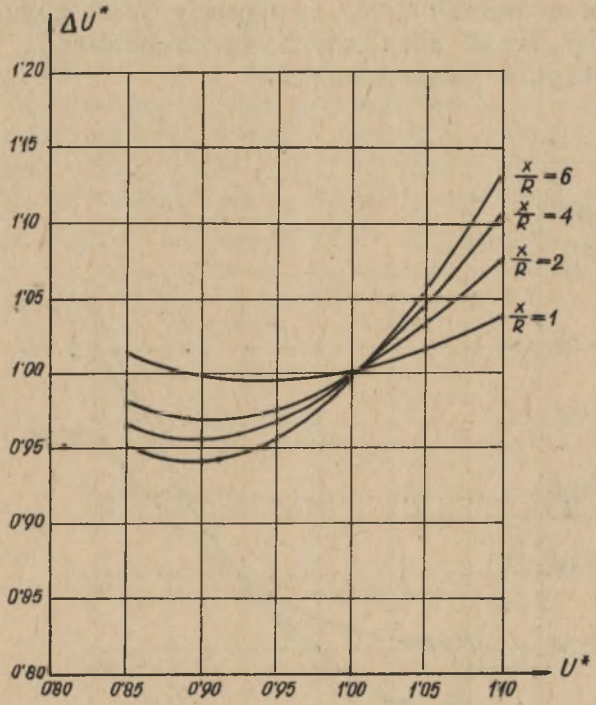
Rys.4. Wykres zależności $\alpha_u = F(X/R)$

Krzywa 1 - $\alpha_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0,55$ oraz naturalnego współczynnika $\cos\varphi_{zn} = 0,60$, Krzywa 2 - $\alpha'_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0,55$, po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0,60$ do 0,90

Przy wzroście stosunku X/R, minimum zależności $\Delta U = F(U)$ przesuwa się w kierunku niższych wartości napięć.

Po poprawie naturalnego współczynnika mocy do pewnej określonej wartości $\cos\varphi'$ - zmienia się wartość współczynnika α_u na α'_u. Po zastosowaniu kompensacji mocy biernej uzyskamy więc nową zależność $\Delta U = F(U)$. Na rys.2, 3 i 4 wykreślono zależności $\alpha_u = F(X/R)$ - krzywe 2,

określone po poprawie naturalnych współczynników mocy ($\cos\varphi'_{zn}$ = 0,85, 0,70, 0,60) do wartości $\cos\varphi'$ = 0,90.

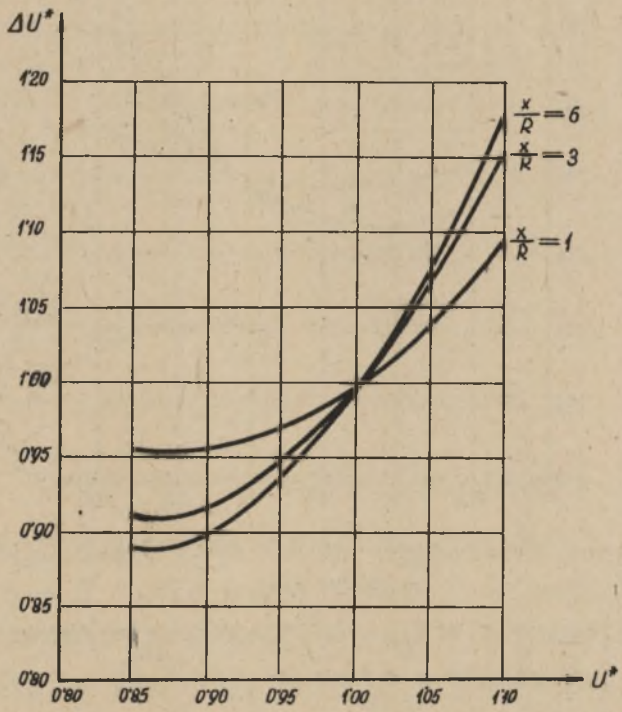


Rys.5. Wykresy zależności $\Delta U^* = F(U')$ dla różnych stosunków X/R

Krzywe wyznaczone dla K_u = 0,55 oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn}$ = 0,85

Z podanych wykresów wnioskujemy, że przy wysokich wartościach naturalnych współczynników mocy przed zastosowaniem kompensacji mocy biernej - różnice w wartościach α_u i α'_u nie są znaczne (rys.2), a więc tym samym różnice w przebiegach zależności $\Delta U = F(U)$ i $\Delta U' = F(U)$ będą również niewielkie. Natomiast różnice w wartościach α_u i α_u są tym większe, im niższe są wartości naturalnych współ-

czynników mocy przed zastosowaniem kompensacji (rys.3 i 4). Wynika stąd wniosek, że różnice w przebiegach zależności $\Delta U = F(U)$ i $\Delta U' = F(U)$ dla tych przypadków będą dość znaczne. Należy również zaznaczyć, że zależność $\alpha' = F(X/R)$ uzyskuje łagodny przebieg przy tym większych wartościach stosunku X/R, im niższy jest naturalny współczynnik mocy przed zastosowaniem kompensacji i im większy jest stopień kompensacji.

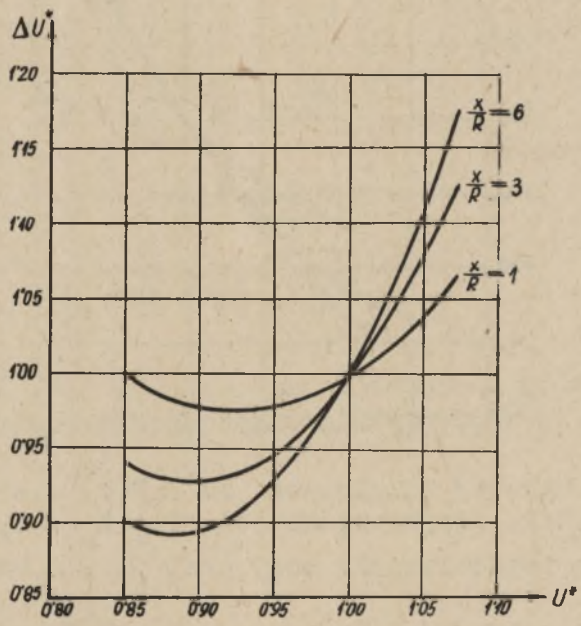


Rys.6. Wykresy zależności $\Delta U^* = F(U)$ dla różnych stosunków X/R

Krzywe wyznaczono dla $K_u = 0,55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$

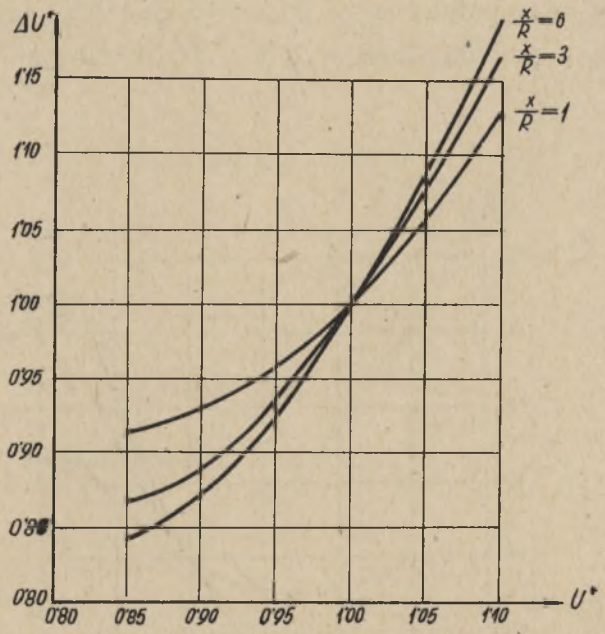
Z porównania krzywych 1 i 2 na rys. 2,3 oraz 4 wynika ponadto, że w miarę wzrostu naturalnego współczynnika mocy - współczynnik α'_u jest większy od α''_u przy coraz wyższych wartościach stosunku X/R. Na rys.7 i 9 wykreślono zależności $\Delta U' = F(U)$ - określone po poprawie naturalnych współczynników mocy z $\cos\varphi_{zn} = 0,7$ i 0,6 do $\cos\varphi' = 0,90$. Podane wykresy całkowicie potwierdzają wnioski wysunięte z analizy wykresów $\alpha' = F(X/R)$.

Z przeprowadzonej wyżej analizy wynika, że dla wszystkich typów linii ($X/R < 3$) będziemy mieli zawsze stromy przebieg zależności $\alpha_u = F(X/R)$, zaś dla transformatorów mających - jak wiadomo - $X/R > 10$ przebieg ten będzie



Rys.7. Wykresy zależności $\Delta U^{*\prime} = F(U)$ dla różnych stosunków X/R, po poprawie naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ do 0,90

bardzo płaski. Jeśli więc droga elektryczna przepływu prądu będzie się składała z stosunkowo krótkich linii przesyłowych różnych napięć i np. 3-krotnej transformacji, to wypadkowa wielkość $R/X \gg 3$, a zatem krzywa zależności $\alpha_u = F(X/R)$ będzie miała płaski przebieg. W przeciwieństwie do tego krzywa $\Delta U = F(U)$ będzie miała przebieg stromy.



Rys.8. Wykresy zależności $\Delta U^* = F(U^*)$ dla różnych stosunków X/R. Krzywe wyznaczone dla $K_u = 0,55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,60$

Zależność U = F(f) automatycznych regulatorów napięcia

Podczas dokonywania pomiarów częstotliwościowych charakterystyk statycznych odbioru stwierdzono, że zmianie częstotliwości towarzyszy jednocześnie zmiana napięcia na szynach zbiorczych elektrowni. A zatem wpływ częstotliwości na moc bierną pobieraną z szyn zbiorczych elektrowni jest podwójny. Oprócz bezpośredniego wpływu częstotliwości na pobieraną moc mamy ponadto wpływ pośredni, wynikający ze zmiany napięcia wywołanej zmianą częstotliwości. Możemy więc ogólnie stwierdzić, że

$$Q = F(f,U)$$

Różniczkując tą zależność względem częstotliwości otrzymujemy

$$\frac{dQ}{df} = \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \tag{7}$$

Wielkość dU/df może być określona równaniem

$$\frac{dU}{df} = \frac{\partial U}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{dQ}{df} \tag{8}$$

Analizując wzór (8) widzimy, że na zmianę napięcia pod wpływem zmiany częstotliwości ma również wpływ iloczyn

$$\frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{dQ}{df}$$

Wpływ ten jest stosunkowo nieznaczny, gdyż wielkość $\partial U/\partial Q$ - przedstawiająca sobą statyzm regulatora napięcia jest rzędu 0,02 - 0,04. Możemy więc napisać, że

$$\frac{dU}{df} \cong \frac{\partial U}{\partial f} \tag{9}$$

oraz wielkość dU/df uważać za charakterystyczną dla regulatora napięcia. W tablicy 2 podano wartości współczynników względnego nachylenia zależności U = F(f) - uzyskane z pomiarów przeprowadzonych na różnych turbozespołach pracujących w krajowym układzie energetycznym.

Tablica 2

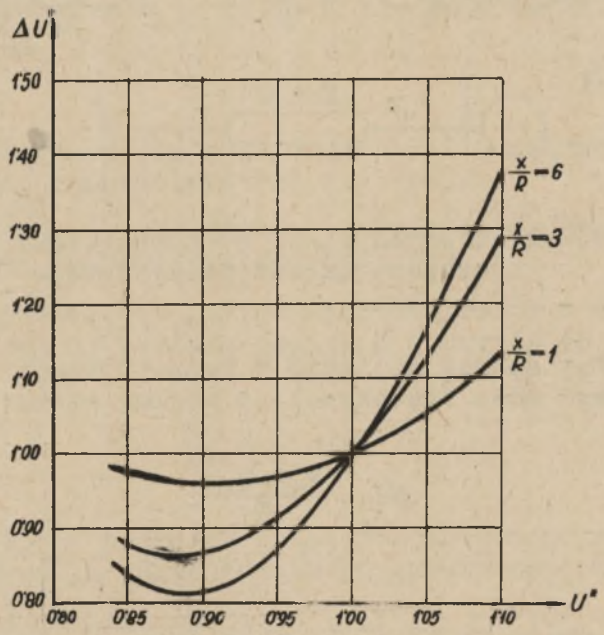
Zestawienie współczynników względnego nachylenia zależności U = F(f) automatycznych regulatorów napięcia

Nazwa elektrowni	$K_r = \frac{dU}{df} \cdot \frac{f_{zn}}{U_{zn}}$
Elektrownia Szczecin	
turbozespół Nr 6	≅0,82
" Nr 1	≅1,00
" Nr 2,3,4 i 5	≅1,10
Elektrownia Dychów	
turbozespół Nr 3	≅1,10
Elektrownia Poznań	
turbozespół Nr 1, 2	≅0,80
Elektrownia Gorzów Wlp.	
turbozespół Nr 1, 2, 3	≅0,65
Elektrownia Otmuchów	
turbozespoł Nr 1, 2	≅0,65
Elektrownia Szombierki	≅0,70
Elektrownia Zabrze	≅0,65
Elektrownia Jaworzno II	≅1,00

Jak wynika z tablicy 2, wartości współczynników K_r mieszczą się w zakresie 0,65 - 1,1.

Wpływ zmiany częstotliwości na spadki napięcia występujące w układzie przesyłowym

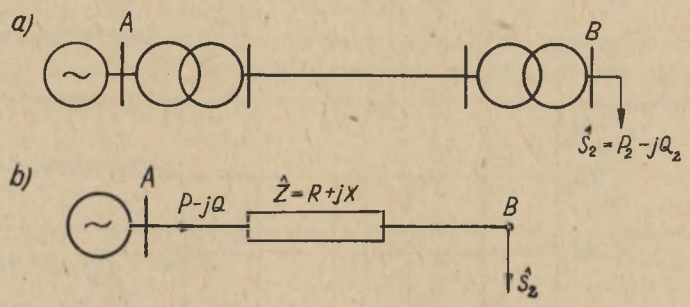
Na rys.10 przedstawiono prosty układ przesyłowy, składający się z transformatora podwyższającego, linii przesyłowej oraz transformatora obniżającego. Uproszczony schemat zastępczy tego układu, z pominięciem oporności poprzecznych, podano na rys.10b.



Rys.9. Wykresy zależności $\Delta U'' = F(U'')$ dla różnych stosunków X/R - po poprawie naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0{,}60$ do $0{,}90$

Zakładamy, że przy zmianie częstotliwości w układzie - napięcie na szynach zbiorczych elektrowni (pkt A) nie ulega zmianie ($dU/df = 0$). Wobec tego występująca równocześnie ze zmianą częstotliwości zmiana poziomu napięcia na krańcu odbiorczym (pkt B), będzie spowodowana zmianą pobieranej mocy czynnej i biernej oraz zmianą wartości

oporności indukcyjnej (X) układu przesyłowego. Wielkość zmiany napięcia w punkcie B możemy określić na podstawie znajomości ilościowego wpływu zmiany częstotliwości na podłużny spadek napięcia.



Rys.10. a) układ przesyłowy, b) uproszczony schemat zastępczy układu przesyłowego

Podłużny spadek napięcia w rozpatrywanym układzie przesyłowym może być określony według wzoru

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \tag{10}$$

gdzie

U - napięcie na szynach zbiorczych elektrowni (pkt A rys.10),

P,Q - moc czynna i bierna na początku układu przesyłowego (pkt A rys.10),

R,X - całkowita oporność wzdłużna czynna i bierna rozpatrywanego układu przesyłowego.

Analizę wpływu zmiany częstotliwości na podłużny spadek napięcia przeprowadzimy w oparciu o współczynnik względnego nachylenia zależności $\Delta U = F(f)$. W celu wy-

prowadzenia wzoru określającego wymieniony współczynnik, szukamy pochodnej z wyrażenia (10) względem częstotliwości

$$\frac{d\Delta U}{df} = \frac{\partial \Delta U}{\partial P} \cdot \frac{dP}{df} + \frac{\partial \Delta U}{\partial Q} \cdot \frac{dQ}{df} + \frac{\partial \Delta U}{\partial X} \cdot \frac{dX}{df} + \frac{\partial \Delta U}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \qquad (11)$$

Do równania (11) podstawiamy następujące zależności

$$\frac{dP}{df} = K_f \cdot \frac{P}{f}, \quad \frac{dQ}{df} = L_f \cdot \frac{Q}{f}, \quad \frac{dX}{df} = 1 \cdot \frac{X}{f}, \quad Q = P\,tg\varphi$$

gdzie

K_f - współczynnik względnego nachylenia częstotliwościowej charakterystyki $P = F(f)$,

L_f - współczynnik względnego nachylenia częstotliwościowej charakterystyki $Q = F(f)$.

Jeśli przyjmiemy, że zmiana częstotliwości w układzie nie powoduje zmiany poziomu napięcia w pkt A, to

$$\frac{dU}{df} = 0$$

Po podstawieniu podanych wyżej zależności do równania (11) oraz dokonaniu odpowiednich przekształceń otrzymujemy:

$$\frac{d\Delta U}{df} = \frac{\Delta U}{f}\left[\frac{K_f + \frac{X}{R}\,tg\varphi\,(L_f + 1)}{1 + \frac{X}{R}\,tg\varphi}\right]$$

stąd

$$\alpha_f = \frac{K_f + \frac{X}{R}\,tg\varphi\,(L_f + 1)}{1 + \frac{X}{R}\,tg\varphi} = \frac{d\Delta U}{df} \cdot \frac{f}{\Delta U} \qquad (12)$$

Po kompensacji mocy biernej w celu poprawy naturalnego współczynnika mocy do pewnej określonej wartości $\cos\varphi'$ - wzór (12) przyjmie postać

$$\alpha_f = \frac{K_f + \frac{X}{R}\,tg\varphi'(L_f' + 1)}{1 + \frac{X}{R}\,tg\varphi'} = \frac{d\Delta U'}{df} \cdot \frac{f}{\Delta U'} \qquad (13)$$

gdzie

L_f' - współczynnik względnego nachylenia częstotliwościowej charakterystyki $Q' = F(f)$.

Współczynnik ten określamy według wzoru

$$L_f' = \frac{L_f tg\varphi - (tg\varphi - tg\varphi')}{tg\varphi'} = \frac{dQ'}{df} \cdot \frac{f}{Q'} \qquad (14)$$

$tg\varphi$ - tangens kąta przesunięcia fazowego przed kompensacją,

$tg\varphi'$ - tangens kąta przesunięcia fazowego po kompensacji,

Q' - moc bierna pobierana przez odbiór po kompensacji.

Korzystając z wzorów (12) i (13) oraz zestawionych w tablicy 3 wartości współczynników K_f i L_f - przeprowadzimy obecnie analizę zależności $\Delta U = F(f)$

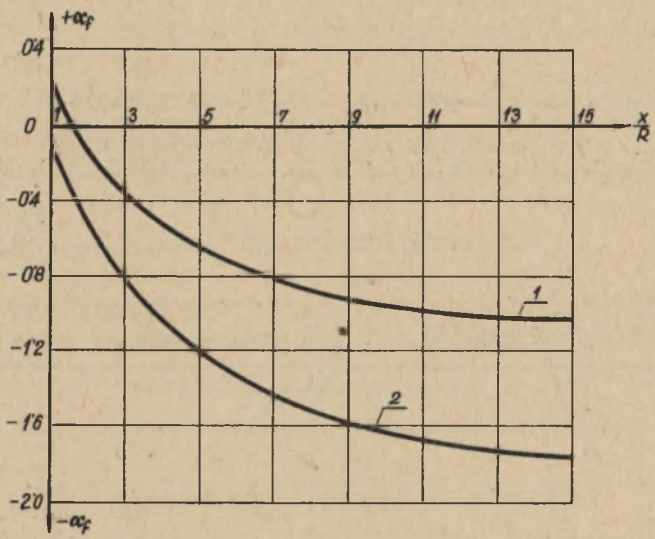
Z wzoru (13) wynika, że wartość współczynnika α_f - określającego przy zadanym poziomie częstotliwości stromość przebiegu zależności $\Delta U = F(f)$ - zależy od wartości współczynników L_f, K_f oraz od $tg\varphi$ i stosunku X/R. Na rys.11, 12 i 13 wykreślono zależności $\alpha_f = F(X/R)$ - krzywe 1, wyznaczone dla 3 różnych naturalnych współczynników mocy ($\cos\varphi_{zn}$ = 0,85, 0,70 i 0,60) i odpowiadających im współczynników L_f.

Tablica 3

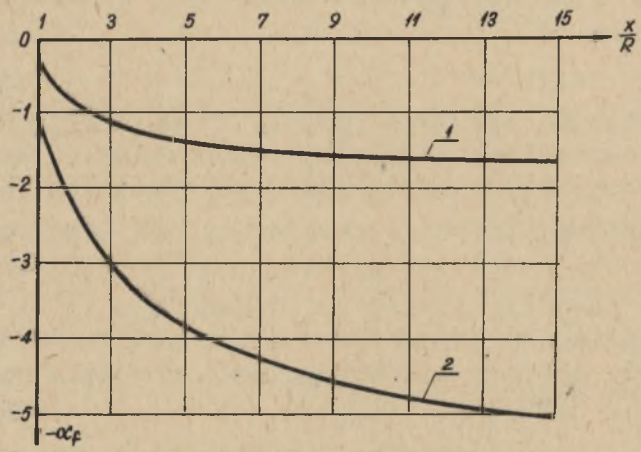
Zestawienie wartości współczynników K_f i L_f dla zakładów przemysłowych

Wartości współczynników $K_f = \frac{dP}{df} \cdot \frac{f_{zn}}{P_{zn}}$		
przedpołudniowy	wieczorny	nocny
1,1		
Wartości współczynników $L_f = \frac{dQ}{df} \cdot \frac{f_{zn}}{Q_{zn}}$		
dla $\cos\varphi_{zn} \geqslant 0,85$	- 2,3	
dla $0,80 \leqslant \cos\varphi_{zn} < 0,85$	- 2,5	
dla $0,70 \leqslant \cos\varphi_{zn} < 0,80$	- 2,8	
dla $\cos\varphi_{zn} < 0,70$	- 3,1	

Z podanych wykresów (krzywe 1) wnioskujemy, że im niższe są wartości naturalnych współczynników mocy, tym wyższe są bezwzględne wartości współczynników α_f, a więc tym bardziej strome są zależności $\Delta U = F(f)$. Współczynniki α_f mają wartości ujemne, a zatem obniżenie częstotliwości powoduje wzrost podłużnego spadku napięcia i tym samym obniżenie napięcia na krańcu odbiorczym w pkt B (rys.10). Jedynie dla naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,85$ oraz stosunku $X/R < 1,4$ - współczynnik α_f ma wartość dodatnią. W wymienionym przypadku, obniżenie częstotliwości powoduje obniżenie spadku napięcia i tym samym wzrost napięcia na krańcu odbiorczym. Ze względu na niską wartość współczynnika α_f - wzrost napięcia będzie jednak nieznaczny. Należy podkreślić, że

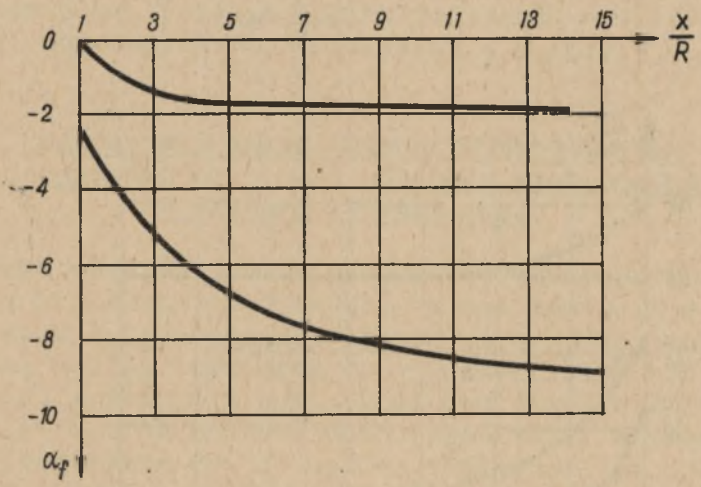


Rys.11. Wykresy zależności $\alpha_f = F(X/R)$
Krzywa 1 - $\alpha_f = F(X/R)$ dla $k_f = 1,1$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,85$. Krzywa 2 - $\alpha'_f = F(X/R)$ dla $k_f = 1,1$ po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0,85$ do 90



Rys.12. Wykresy zależności $\alpha_f = F(X/R)$
Krzywa 1 - $\alpha_f = F(X/R)$ dla $k_f = 1,1$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$. Krzywa 2 - $\alpha'_f = F(X/R)$ dla $k_f = 1,1$, po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ do 0,90

we wszystkich 3 rozpatrywanych przypadkach, bezwzględna wartość współczynnika α_f jest nie większa od 2 - nawet przy stosunku X/R = 15 i naturalnym współczynniku mocy $\cos\varphi_{zn}$ = 0,60. Jeżeli przyjmiemy, że podłużny spadek napięcia w układzie przesyłowym wynosi na przykład 10%, to obniżenie częstotliwości o 1% - przy największej bezwzględnej wartości współczynnika α_f (α_f = - 2), wywołała obniżenie napięcia na krańcu odbiorczym zaledwie o 0,2%[x]. W przypadku naturalnych częstotliwościowych charakterystyk statycznych Q = F(f), wpływ zmiany częstotliwości na zmianę poziomów napięć w węzłach sieciowych jest więc nieznaczny[xx].



Rys.13. Wykresy zależności α_f = F(X/R)

Krzywa 1 - α_f = F(X/R) dla k_f = 1,1 oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn}$ = 0,60. Krzywa 2 - α'_f = = F(X/R) dla k_f = 1,1 po poprawie $\cos\varphi_{zn}$ = 0,60 do 0,90

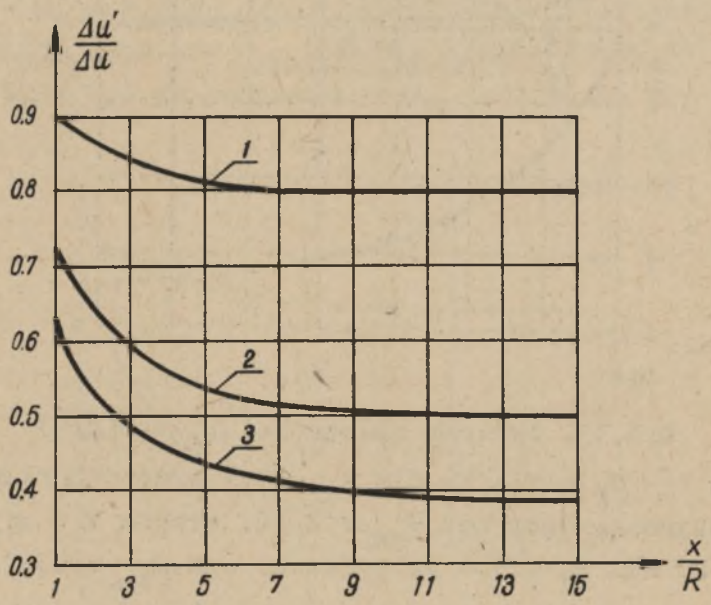
---

x) Przy nieuwzględnieniu jednoczesnej zmiany poboru mocy czynnej i biernej wg napięciowych charakterystyk statycznych odbioru.

xx) Przy założeniu, że napięcie na szynach zbiorczych elektrowni nie ulega zmianie (U_A = const).

Na rys.11, 12 i 13 wykreślono zależności $\alpha'_f = F(X/R)$ - krzywe 2 - określone po poprawie naturalnych współczynników mocy ($\cos\varphi_{zn}$ = 0,85, 0,70, 0,60) do $\cos\varphi' = 0,90$. Z porównania krzywych 1 i 2 wynika, że im niższe są wartości naturalnych współczynników mocy przed zastosowaniem kompensacji mocy biernej, tym wyższe są bezwzględne wartości współczynników α'_f przy tych samych stosunkach X/R. Należy jednak podkreślić, że wartość współczynnika α'_f - zgodnie z wzorem (13) - odniesiona jest do wartości $\Delta U'$, która w wyniku zastosowania kompensacji mocy biernej jest mniejsza od wartości ΔU. Wartość podłużnego spadku napięcia $\Delta U'$ możemy określić wg wzoru

$$\Delta U' = \Delta U \cdot \frac{1 + \frac{X}{R} \operatorname{tg}\varphi'}{1 + \frac{X}{R} \operatorname{tg}\varphi} \qquad (15)$$



Rys.14. Wykresy zależności $\Delta U'/\Delta U = F(X/R)$

Krzywa 1 - po poprawie $\cos\varphi_{zn}$ = 0,85 do 0,90. Krzywa 2 - po poprawie $\cos\varphi_{zn}$ = 0,70 do 0,90. Krzywa 3 - po poprawie $\cos\varphi_{zn}$ = 0,60 do 0,90

Na rys.14 podano wykresy zależności $\Delta U'/\Delta U = F(X/R)$ określone po poprawie naturalnych współczynników mocy $\cos\varphi_{zn} = 0{,}85$, $0{,}70$, $0{,}60$ do $\cos\varphi' = 0{,}90$. Z podanych wykresów wnioskujemy, że im są niższe wartości naturalnych współczynników mocy przed zastosowaniem kompensacji mocy biernej, tym mniejsze są wartości $\Delta U'$ w stosunku do ΔU. Ponadto w miarę wzrostu stosunku X/R, wartości $\Delta U'$ są coraz mniejsze. Wyższe wartości α_f' odnoszą się zatem do stosunkowo niskich wartości $\Delta U'$.

Z przeprowadzonych wyżej rozważań wnioskujemy, że z wzrostem stopnia kompensacji wzrasta wpływ zmiany częstotliwości na wartość podłużnego spadku napięcia (wysokie wartości α_f'). Wobec jednak znacznie niższych wartości $\Delta U'$ - występująca równocześnie ze zmianą częstotliwości zmiana poziomów napięć w węzłach sieciowych będzie niewielka, podobnie jak w przypadku naturalnych częstotliwościowych charakterystyk $Q = F(f)$.

Jednoczesny wpływ zmiany częstotliwości i napięcia na spadki napięcia występujące w układzie przesyłowym

Zmianie częstotliwości w układzie towarzyszy zmiana napięcia w węzłach sieciowych. Zmiana napięcia w węzłach wywołuje jednocześnie zmianę poboru mocy czynnej i biernej według napięciowych charakterystyk odbioru, co z kolei w pewnym stopniu kompensuje wpływ zmiany częstotliwości na zmianę poziomu napięcia. A zatem wpływ zmiany częstotliwości na spadek napięcia jest podwójny: z jednej strony mamy bezpośredni wpływ zmiany częstotliwości, a z drugiej strony wpływ pośredni, wynikający ze zmiany napięcia pod wpływem zmiany częstotliwości. Ogólnie więc mamy zależność $\Delta U = F(f,U)$ i wobec tego możemy napisać, że

$$\frac{d\Delta U}{df} = \frac{\partial \Delta U}{\partial f} + \frac{\partial \Delta U}{\partial U} \cdot \frac{dU}{df} \qquad (16)$$

stąd

$$\alpha_{f,U} = \alpha_f + \alpha_u \cdot \beta \tag{17}$$

gdzie

$\beta = \frac{dU}{df} \cdot \frac{f}{U}$ - współczynnik, określający względną zmianę napięcia wywołaną przez zmianę częstotliwości,

α_f, α_u - współczynniki względnego nachylenia zależności $\Delta U = F(f)$ oraz $\Delta U = F(U)$ - określone dla tego samego punktu układu.

Z poprzednich rozważań wiadomo, że współczynniki α_f mają wartości dodatnie jedynie dla $\cos\varphi_{zn} > 0,85$ oraz stosunku $X/R < 1,4$ - natomiast dla przeważającej ilości przypadków $\alpha_f < 0$. Jeśli założymy, że na początku układu $dU/df \geqslant 0$, to dla $\alpha_f < 0$ mamy $\beta > 0$ - a zatem iloczyny $\alpha_u \cdot \beta$ są w przeważającej ilości przypadków dodatnie, gdyż $\alpha_u > 0$. Wnioskujemy stąd, że bezwzględne wartości współczynników $|\alpha_{f,U}| < |\alpha_f|$.

Przy założeniu U = const. na początku układu - wartość współczynnika $\alpha_{f,U}$ możemy określić wg wzoru

$$\alpha_{f,U} = \alpha_f \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100} \cdot \alpha_u\right) \tag{18}$$

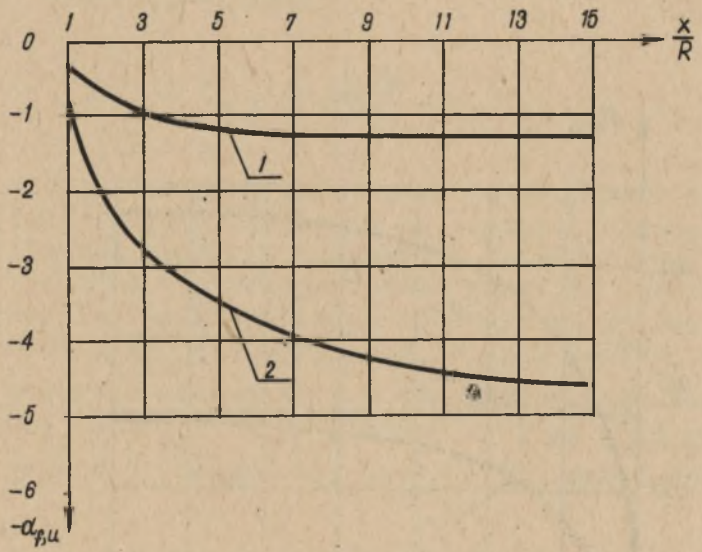
gdzie

$\Delta U\%$ - procentowy wzdłużny spadek napięcia.

Na rys.15 podano wykres zależności $\alpha_{f,U} = F(X/R)$ dla przeciętnej wartości naturalnego współczynnika mocy - $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ (krzywa 1), oraz wykres zależności $\alpha'_{f,U} = F(X,R)$ po poprawie naturalnego $\cos\varphi'_{zn} = 0,70$

do $\cos\varphi' = 0{,}90$ - krzywa 2[x]. Znając wartości współczynnika $\alpha_{f,U}$ możemy określić wielkość odchylenia napięcia na krańcu odbiorczym - przy zmianie częstotliwości w układzie o 1% - wg wzoru

$$\delta U_{f,U} = -\frac{\Delta U\%}{100} \cdot \alpha_{f,U} \qquad (19)$$



Rys.15. Wykresy zależności $\alpha_{f,U} = F(X/R)$

Krzywa 1 - $\alpha_{f,u} = F(X/R)$ dla $K_f = 1{,}1$, $K_u = 0{,}55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0{,}70$. Krzywa 2 - $\alpha'_{f,u} = F(X/R)$ dla $K_f = 1{,}1$, $K_u = 0{,}55$ po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0{,}70$ do 0,90

---

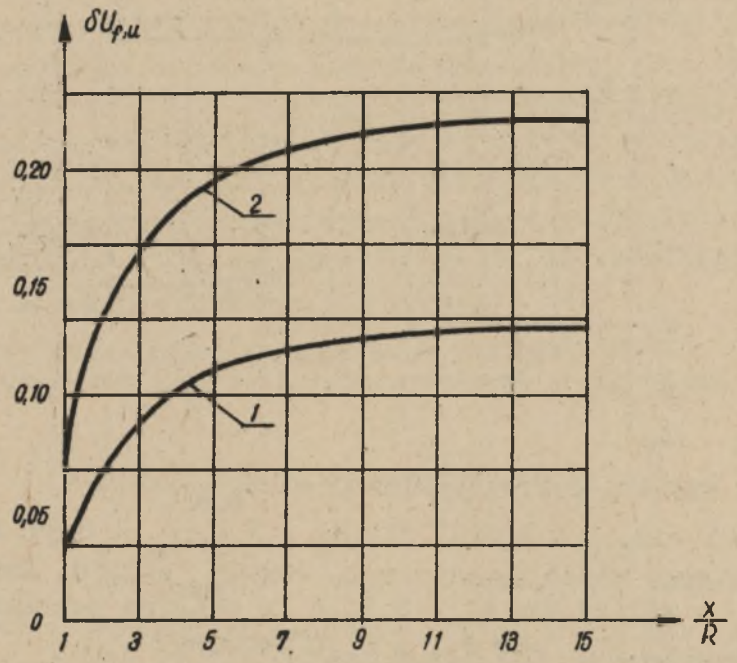
x) Wartości współczynnika $\alpha'_{f,U}$ określono wg wzoru (21) - przy wykorzystaniu zależności $\Delta U'/\Delta U = F(X/R)$ - krzywa 2 na rys.14, zależności $\alpha'_f = F(X/R)$ - krzywa 2 na rys.13 i zależności $\alpha'_u = F(X/R)$ - krzywa 2 na rys.3. Przyjęto również, że przed kompensacją mocy biernej $\Delta U = 10\%$.

- a po poprawie naturalnego współczynnika mocy wzór (19) przyjmie postać

$$\delta U'_{f,U} = -\frac{\Delta U'\%}{100} \cdot \alpha'_{f,U} \tag{20}$$

gdzie

$$\alpha'_{f,U} = \alpha_f \left(1 - \frac{\Delta U'\%}{100} \cdot \alpha'_u\right) \tag{21}$$



Rys.16. Wykresy zależności $\delta U_{f,u} = F(X/R)$

Krzywa 1 - $\delta U_{f,u} = F(X/R)$ dla $K_f = 1,1$, oraz $K_u = 0,55$ i naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$. Krzywa 2 - $\delta U_{f,u} = F(X/R)$ dla $K_f = 1,1$; $K_u = 0,55$, po poprawie $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ do $0,90$

Na rys.16 podano wykresy zależności $\delta U_{f,U} = F(X/R)$ i $\delta U'_{f,U} = F(X/R)$. Z wykresów tych wynika, że dla współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ i po jego poprawie do $\cos\varphi' = 0,90$, zmiana napięcia na krańcu odbiorczym - przy zmianie częstotliwości o 1% - nie jest większa od ok. 0,22%.

Załóżmy obecnie, że na początku układu przesyłowego zmieniamy poziom napięcia o K_r procent. Wówczas na krańcu odbiorczym zmienia się napięcie nie o K_r procent, ale o wielkość określoną wzorem:

$$\delta U_u = K_r \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100} \cdot \alpha_u\right) \tag{22}$$

- zmianie napięcia bowiem towarzyszy jednocześnie zmiana spadku napięcia. Jeżeli napięcie na początku układu obniżamy, to spadek napięcia w układzie maleje i obniżenie napięcia na krańcu odbiorczym będzie przez to częściowo kompensowane. Na rys.17 pokazano wykresy zależności $\delta U_u = F(X/R)$[x)] i $\delta U'_u = F(X/R)$ przy zmianie poziomu napięcia na początku układu o 1% - dla naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ (krzywa 1) i po jego poprawie do $\cos\varphi' = 0,9$ (krzywa 2). Wartość $\delta U'_u$ określiano wg wzoru

$$\delta U'_u = K_r \left(1 - \frac{\Delta U'\%}{100} \cdot \alpha'_u\right) \tag{23}$$

- w rozważanym przypadku przyjęto $K_r = 1$.

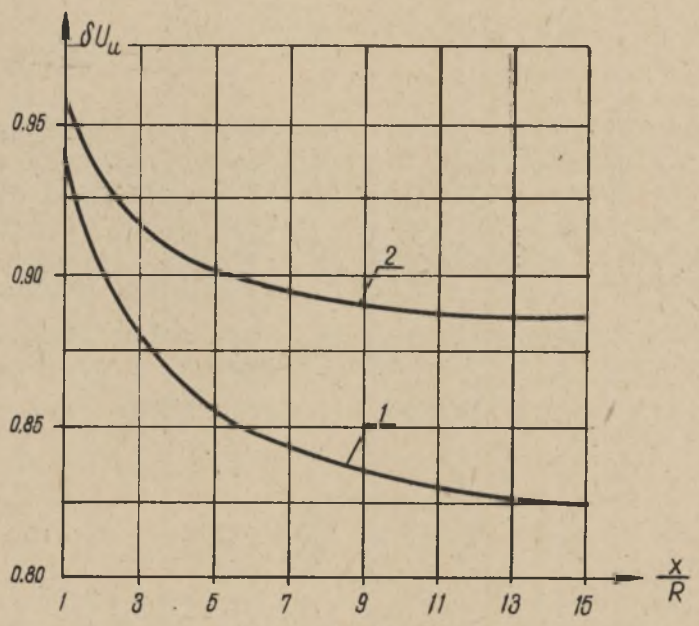
Jeśli obniżeniu częstotliwości o 1% towarzyszy jednocześnie obniżenie napięcia na początku układu o K_r procent - to wówczas całkowite odchylenie napięcia na krańcu odbiorczym wynosi

$$\delta U = \delta U_{f,u} + \delta U_u \tag{24}$$

---

x) Przy założeniu, że $\Delta U = 10\%$. Przy określaniu $\delta U'_u$ (wzór 23) korzystano z wykresu $\Delta U'/\Delta U = F(X/R)$ podanego na rys.14 - krzywa 2.

Z wzoru (24) wynika, że na całkowite odchylenie napięcia na krańcu odbiorczym składa się: odchylenie napięcia spowodowane zmianą spadku napięcia pod wpływem zmiany częstotliwości oraz odchylenie napięcia wywołane skutkiem zmiany napięcia na początku układu pod wpływem zmiany częstotliwości. Z poprzednich rozważań wiadomo, że zmiana napięcia na początku układu spowodowana jest głównie zależnością U = F(f) automatycznego regulatora napięcia.



Rys.17. Wykresy zależności $\delta U_u = F(X/R)$
Krzywa 1 - $\delta U_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0,55$ i $K_r = 1$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{zn} = 0,70$. Krzywa 2 - $U_u = F(X/R)$ dla $K_u = 0,55$, $K_r = 1$ - po poprawie $\cos \varphi_{zn} = 0,70$ do 0,90

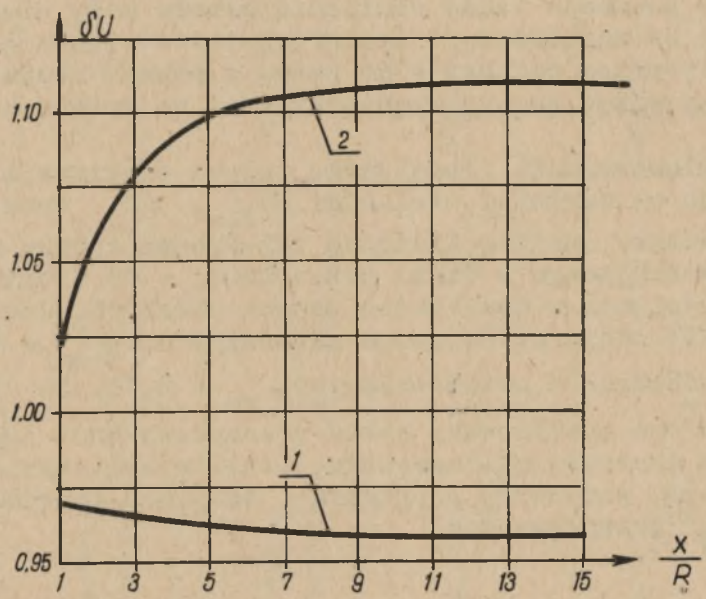
Wobec tego wielkość K_r w wzorach (22) i (23) odpowiada współczynnikom względnego nachylenia zależności U = F(f) automatycznych regulatorów napięcia. Wartość tego współczynnika mieści się w zakresie 0,65 - 1,1.

Jeśli do wzoru (24) podstawimy odpowiednio wyrażenia określone wzorami (19) i (22) to otrzymamy, że

$$\delta U = -\frac{\Delta U\%}{100} \cdot \alpha'_{f,u} + K_r \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100} \cdot \alpha_u\right) \qquad (25)$$

- a po kompensacji mocy biernej

$$\delta U' = -\frac{\Delta U'\%}{100} \cdot \alpha'_{f,u} + K_r \left(1 - \frac{\Delta U'\%}{100} \cdot \alpha'_u\right) \qquad (26)$$



Rys.18. Wykresy zależności $\delta U = F(X/R)$ i $\delta U' = F(X/R)$ przy zmianie częstotliwości o 1% oraz przy występującej jednocześnie zmianie napięcia na początku układu o 1% ($K_r = 1$)

Krzywa 1 - dla naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn}$=0,70
Krzywa 2 - po poprawie $\cos\varphi_{zn}$ = 0,70 do 0,90.

Na rys.18 podano wykresy zależności $\delta U = F(X/R)$ i $\delta U' = F(X/R)$ przy zmianie częstotliwości o 1% oraz przy występującej jednocześnie zmianie napięcia na początku układu o 1% ($K_r = 1$) - dla naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{zn} = 0,70$ (krzywa 1) i po jego poprawie do $\cos\varphi' = 0,90$ (krzywa 2).

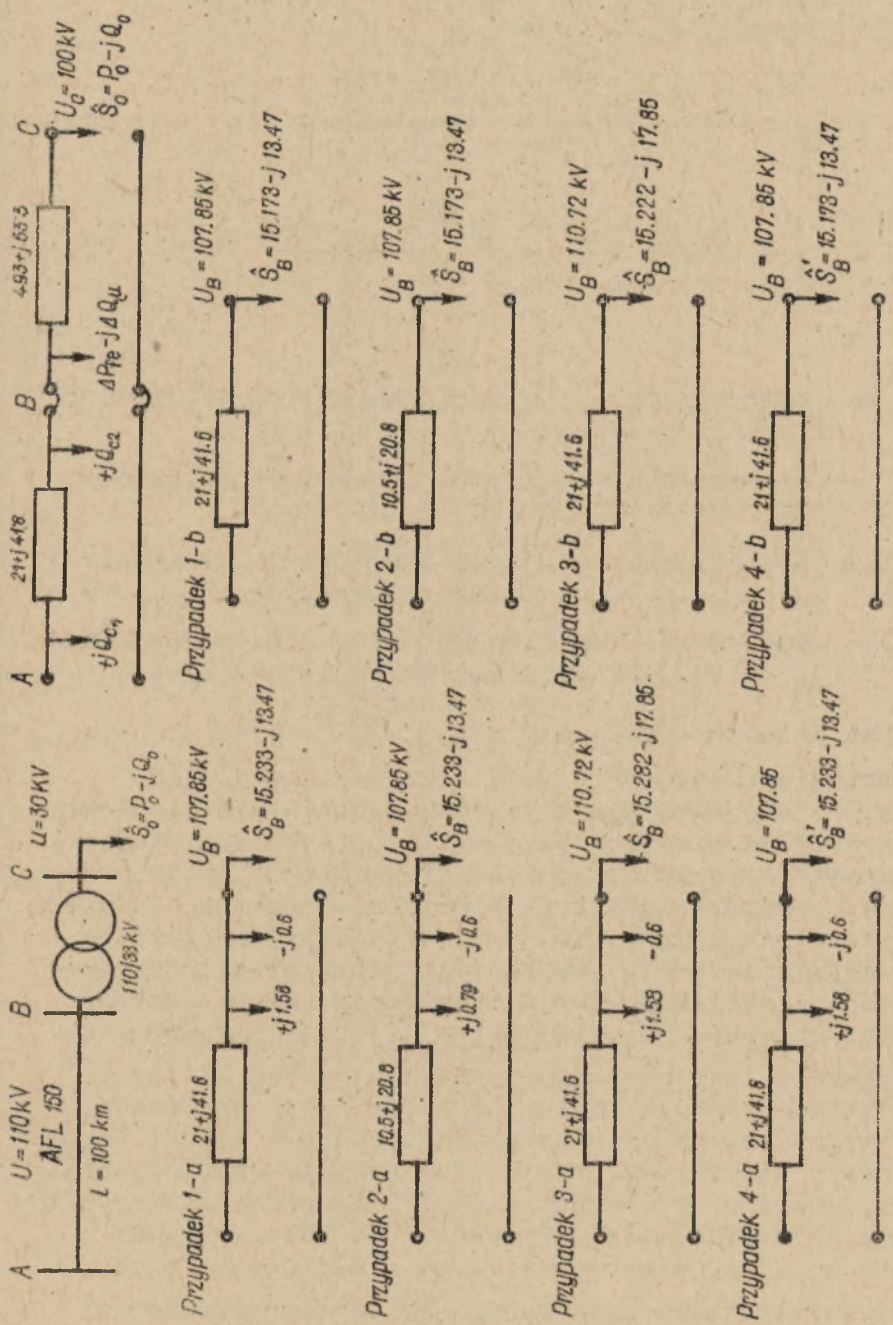
W rozważaniach dotychczasowych nie uwzględniono wpływu zmiany częstotliwości na moc bierną generowaną przez pojemność linii przesyłowych wyższych napięć oraz na straty mocy, występujące w opornościach poprzecznych transformatorów. Obniżenie częstotliwości w układzie powoduje zmniejszenie mocy biernej generowanej przez pojemność linii przesyłowych, oraz wzrost mocy biernej zużywanej na magnesowanie transformatorów - co w rezultacie wywołuje obniżenie poziomów napięć w układzie. To obniżenie napięcia wywołuje wprawdzie dalsze obniżenie mocy biernej generowanej przez pojemność linii, ale równocześnie powoduje także obniżenie poboru mocy biernej zużywanej na magnesowanie transformatorów - oraz mocy pobieranej przez odbiory - co znowu w pewnym stopniu kompensuje wpływ zmiany częstotliwości na zmianę napięcia.

Dla zilustrowania ilościowego wpływu reaktancji poprzecznych na wartości wielkości $\delta U_{f,u}$, δU_u oraz δU, przeprowadzimy analizę liczbową zależności spadku napięcia - występującego w linii przesyłowej - od częstotliwości i napięcia w dwu takich samych układach. Jeden z nich zasila odbiorcę mającego naturalny $\cos\varphi_{zn} = 0,8$, a drugi odbiorcę o naturalnym $\cos\varphi_{zn} = 0,70$. Na rys.19 przedstawiono analizowany układ przesyłowy oraz jego zastępcze schematy obliczeniowe. Jeśli w obliczeniach uwzględniamy parametry poprzeczne, to przez impedancje linii ($\hat{Z}_1$) przepływa moc

$$\hat{S}_1 = (P_B + \Delta P_{Fe}) - j\,(Q_B + Q_\mu - Q_{c2}) = P_1 - jQ_1 \qquad (27)$$

gdzie

$$P_B = P_o + \Delta P_T, \quad Q_B = Q_o + \Delta Q_T$$



Rys.19. Układ przesyłowy oraz jego zastępcze schematy obliczeniowe

Współczynnik względnego nachylenia zależności $Q_1=F(f)$ i $Q_1=F(U)$ określamy z wzorów:

$$L_{1,f} = \frac{L_{c,f}(-Q_{c2})+L_{\mu,f}\cdot Q_\mu+L_{o,f}\cdot Q_B}{-Q_{c2}+Q_\mu+Q_B} \tag{28}$$

$$L_{1,u} = \frac{L_{c,u}\cdot(-Q_{c2})+L_{\mu,u}\cdot Q_\mu+L_{o,u}\cdot Q_B}{-Q_{c2}+Q_\mu+Q_B} \tag{29}$$

gdzie

$L_{c,f}$ - współczynnik względnego nachylenia zależności $Q_c = F(f)$ - $L_{c,f} = 1$,

$L_{c,u}$ - współczynnik względnego nachylenia zależności $Q_c = F(U)$ - $L_{c,u} = 2$,

$L_{\mu,f}$ - współczynnik względnego nachylenia zależności $Q_\mu = F(f)$ - w obliczeniach przyjęto $L_{\mu,f} = -5$,

$L_{\mu,u}$ - współczynnik względnego nachylenia zależności $Q_\mu = F(U)$ - w obliczeniach przyjęto $L_{\mu,u} = 5$.

Wyniki obliczeń wielkości $\delta U_{f,u}$, δU_u oraz δU - z uwzględnieniem (przypadki "a") i bez uwzględnienia (przypadki "b") reaktancji poprzecznych - zestawiono w tablicy 4. Z zestawienia tego wynika, że we wszystkich rozważanych przypadkach pominięcie reaktancji poprzecznych nie powoduje uzyskania w końcowym efekcie obliczeń jakiś istotnych różnic, które wskazywałyby na konieczność uwzględnienia w rozważaniach wpływu reaktancji poprzecznych. Pomijalność tych reaktancji wynika przede wszystkim stąd, że różnica $(Q_\mu - Q_c)$ jest zwykle mała w stosunku do mocy biernej przesyłanej przez linię. Jeśli natomiast moc bierna u odbiorcy jest całkowicie lub w wysokim stopniu skompensowana ($\cos\varphi \cong 1$), to przesył odbywa się również przy bardzo wysokim współczynniku mocy. Wówczas we wzorach (4) i (12) człony zawierające $\mathrm{tg}\,\varphi$ są bardzo małe i wpływ ich na końcowy wynik obliczeń α_f i α_u jest pomijalny, a uwzględnienie czy też nieuwzględnienie reaktancji odbija się właśnie na

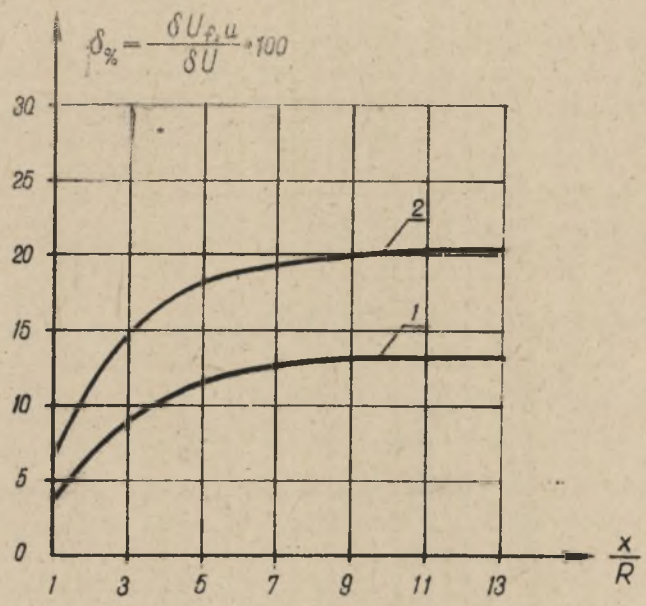
Tablica 4

Zestawienie wyników obliczeń wartości $\delta U_{f,u}$, δU_u i δU x)

Przykład	$L_{o,f}$	$L_{o,u}$	$L_{1,f}$	$L_{1,u}$	$tg\varphi_2$	α_f	α_u	$\alpha_{f,u}$	Kr	$\delta U_{f,u}$	δU_u	δU	ΔU %	l km	Uwagi
1-a	-2,5	2,5	-3,08	2,71	0,82	-0,860	0,91	-0,802	1,0	0,057	0,934	0,991	7,12	100	Naturalny współcz. mocy odbioru $\cos\varphi_{sn} = 0,8$
1-b	-2,5	2,5	-2,50	2,50	0,89	-0,558	0,83	-0,524	1,0	0,039	0,940	0,979	7,36	100	
2-a	-2,5	2,5	-2,81	2,64	0,87	-0,744	0,89	-0,720	1,0	0,026	0,967	0,993	3,68	50	Odbiór jw. ale linia o połowę krótsza
2-b	-2,5	2,5	-2,50	2,50	0,89	-0,558	0,81	-0,540	1,0	0,019	0,970	0,989	3,68	50	
3-a	-3,1	3,1	-3,57	3,26	1,10	-1,435	1,42	-1,260	1,0	0,102	0,882	0,984	8,35	100	Nat. współcz. mocy odbioru $\cos\varphi_{sn} = 0,7$
3-b	-3,1	3,1	-3,1	3,10	1,17	-1,135	1,35	-1,000	1,0	0,087	0,882	0,969	8,75	100	
4-a	-4,44	3,47	-5,17	3,75	0,82	-2,160	1,65	-1,910	1,0	0,136	0,883	1,019	7,12	100	Po poprawie naturalnego $\cos\varphi_{sn} = 0,70$ do $\cos\varphi_{sn} = 0,80$
4-b	-4,44	3,47	-4,44	3,47	0,89	-1,800	1,43	-1,610	1,0	0,119	0,895	1,014	7,36	100	

x) W przypadkach "a" uwzględniono reaktancje poprzeczne linii i transformatora

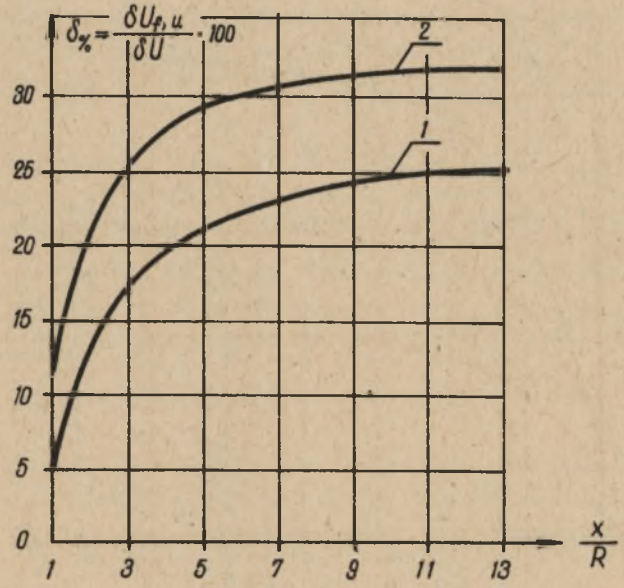
wartościach tych członów. Z przytoczonej wyżej analizy możemy ostatecznie wnioskować, że nieuwzględnienie reaktancji poprzecznych nie ma istotnego wpływu na całość przeprowadzanych rozważań.



Rys.20. Wykresy zależności procentowego stosunku $\delta U_{f,u}/\delta U$ w funkcji X/R - dla K_r = 1% i ΔU = 10%
Krzywa 1 - dla naturalnego cos φ_{zn} = 0,70. Krzywa 2 - po poprawie cos φ_{zn} = 0,70 do 0,90

Zastanowimy się obecnie nad udziałem wielkości $\delta U_{f,u}$ w całkowitym odchyleniu napięcia wywołanym zmianą częstotliwości. W wykresów podanych na rys.20, 21 i 22 wynika, że udział ten wzrasta z wzrostem stosunku X/R. Zastosowanie kompensacji mocy biernej w celu poprawy naturalnego współczynnika mocy, powoduje również wzrost udziału $\delta U_{f,u}$ (por. krzywe 1i 2 na rys.20, 21 i 22). Na wzrost omawianego udziału ma ponadto wpływ wielkość spadku napięcia występującego w układzie przesyłowym

(por. wykresy na rys.20 i 21) oraz wielkość współczynników względnego nachylenia zależności U = F(f) na szynach zbiorczych w elektrowniach (por. wykr. na rys.21 i 22).



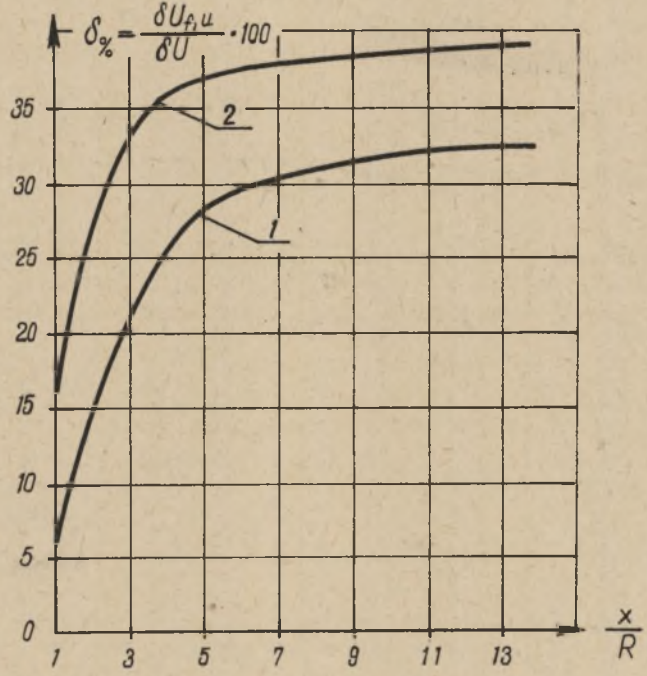
Rys.21. Wykresy zależności procentowego stosunku $\delta U_{f,u}/\delta U$ w funkcji X/R - dla K_r = 1% i ΔU = 20%

Krzywa 1 - dla naturalnego cos φ_{zn} = 0,70. Krzywa 2 - po poprawie cos φ_{zn} = 0,70 do 0,90

Z przeprowadzonych dotąd rozważań możemy wnioskować, że wpływ zmiany częstotliwości na zmianę poziomów napięć w węzłach sieciowych jest nieznaczny, o ile poziomy napięć na szynach zbiorczych w elektrowniach nie ulegają zmianie (por. wykresy na rys.16).

Prawdziwość podanego wyżej wniosku potwierdzają pomiary poziomów napięć w węzłach sieciowych, przy zmianach częstotliwości w układzie. Jeśli przy zmianach częstotliwości w układzie poziom napięcia na szynach zbiorczych w

elektrowniach nie ulegał zmianie, to w węzłach sieciowych zaobserwowano tylko nieznaczne zmiany poziomów napięć.



Rys.22. Wykresy zależności procentowego stosunku $\delta U_{f,u}/\delta U$ w funkcji X/R - dla K_r = 0,7% i ΔU = 20%

Krzywa 1 - dla naturalnego cos φ_{zn} = 0,70. Krzywa 2 - po poprawie cos φ_{zn} = 0,70 do 0,90

Jeśli natomiast zmianie częstotliwości towarzyszyła zmiana napięcia na szynach zbiorczych elektrowni, to według prawie analogicznej zależności zmieniały się poziomy napięć w węzłach sieciowych (por. wykresy na rys.18). Pomiary takie powtarzano wielokrotnie dla szeregu układów, otrzymując każdorazowo zgodność podanych wyżej obserwacji.

Rękopis złożono w redakcji we wrześniu 1963 r.

LITERATURA

[1] A, Bogucki, M. Wójcik: Napięciowe charakterystyki statyczne pobieranej mocy czynnej dla typowych grup odbiorów energetycznych - Energetyka Nr 7-1962.

[2] A. Bogucki, M. Wójcik: Równania naturalnych statycznych charakterystyk napięciowych mocy biernej pobieranej przez typowe grupy odbiorców - Emergetyka Nr 2 1962.

[3] A. Bogucki, M. Wójcik: Równania częstotliwościowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy czynnej dla typowych grup odbiorów - Energetyka Nr 8 1962.

[4] A. Bogucki, M. Wójcik: Równania częstotliwościowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy biernej dla typowych grup odbiorców - Energetyka Nr 5, 1963.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЕВЫХ УЗЛАХ

Содержание

Изменение частоты в энергосистеме вызывает изменение уровней напряжений в сетевых узлах. В статье проведен точный анализ этого вопроса на основании выведенных автором формул.

В рассуждениях учтено частоту и статические характеристики по напряжению приема, изменение параметров линии передач и трансформаторов, а также зависимость $U = F(f)$ регуляторов напряжения.

INFLUENCE DE LA MODIFICATION DE LA FRÉQUENCE DANS LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE SUR LES CHANGEMENTS DES NIVEAUX DES TENSIONS DANS LES NOEUDS DE RESEAUX

R é s u m é

La modification de la fréquence dans le système énergétique produit le changement des niveaux des tensions dans les noeuds des réseaux. Dans ce rapport, on a analysé ce probleme, en ce basant sur les relations déduites par l'auteur. Dans ces considérations on a tenu compte des caracteristiques statiques de fréquence et de tension de la consommation, ensuite du changement des paramètres des lignes de transport et de transformateurs, et enfin, de la dépendance U = F(f) des régulateurs de la tension.