P. 3347 69 ELEKTRYKA z. 26

ANTONI BOGUCKI

WSPÓŁZALEŻNOŚĆ ZMIAN CZĘSTOTLIWOŚCI I NAPIĘCIA W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM W STANACH USTALONYCH

25-lecie Politechniki śląskiej

POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYT NAUKOWY Nr 273 – GLIWICE 1969

SPIS TREŚCI

| | | | | | | | | | | | Str. |
|-------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|----------|------|
| Wstęp | | | | | | | | | • | | 3 |
| Współzależność za noległej gene | mian czę eratorów | stotliw | o śc i i | napię | cia v | v wę | źle p | racy | rów | - | 8 |
| Analiza wpływu w układzie p | zmiany orzesyłow | napięci vym pr | ia na zy sta | spade alej c | ek na zęsto | pięci tliwo | ia wy sci | ystęr | oując | у | 31 |
| Analiza wpływu pujący w ukł cu zasilający | zmiany adzie pr m . | częstot zesyłov · · · | liwośc vym p | ci na orzy st | spad tałym | ek n 1 nar | apięc pięciu | cia v i na | vystę krań | 2- 1- | 37 |
| Wpływ zmiany o na krańcu o | zęstotliw dbiorczy | vości n m ukła | a odc adu p | hylen rzesył | ie na oweg | ipięc: o | ia w | ystęj | pując | e | 41 |
| Wpływ zmiany | częstotli | wości | na s | traty | wzd | łużn | e w | ystęį | pując | e | |
| w układach s | sieciowy | ch , | • | • | • | • | • | • | • | • | 63 |
| Zakończenie | | | | | • | | | • | | | 69 |
| Literatura . | | | | | | | | | | | 76 |
| Streszczenia . | | | | | | | | | | | 79 |



P. 334:7 [69 POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 273

ANTONI BOGUCKI

WSPÓŁZALEŻNOŚĆ ZMIAN CZĘSTOTLIWOŚCI I NAPIĘCIA W systemie elektroenergetycznym W stanach ustalonych

PRACA HABILITACYJNA Nr 98

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 14. III. 1967 r.

GLIWICE 1969

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Dal 74

Fryderyk Staub

REDAKTOR DZIAŁU

Zofia Cichowska

SEKRETARZ REDAKCJI

Witold Gużkowski

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej Gliwice, ul. M. Strzody 18

 Nakł. 100+175
 Ark. wyd. 3,95
 Ark. druk. 5,13
 Papier offsetowy kl. III, 70×100. 70 g

 Oddano do druku 4. 12. 1969
 Podpis. do druku 15. 12. 1969
 Druk ukończ. w grudniu 1969

 Zam
 1541
 4. 12. 1969
 O-23

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach 1. WSTĘP

U podstaw niniejszej pracy leży zagadnienie współzależności zmian częstotliwości i napięcia w systemie elektroenergetycznym w stanach ustalonych.

Wprowadzenie automatyzacji szeregu procesów zachodzących w systemie elektroenergetycznym wyłoniło zagadnienie analizy parametrów systemu elektroenergetycznego jako obiektu automatyzowanego, jego właściwości i powiązania między parametrami regulowanymi.

Dokładna znajomość procesów zachodzących w systemie elektroenergetycznym oraz umiejętność interpretacji jego parametrów i to zarówno pod względem jakościowym i ilościowym, stanowi nieodzowny warunek prawidłowego rozwiązania samego układu automatycznej regulacji [27].

W pracy rozpatrzono problem współzależności zmian częstotliwości i napięcia w węzłach odbiorczych i w węzłach pracy równoległej generatorów, starając się uwzględnić częstotliwościową zależność działania regulatorów napięcia. Celowość uzależnienia regulatorów napięcia od częstotliwości jest na ogół różnie oceniana przez konstruktorów układów regulacji i energetyków.

Uwzględniając fakt, że częstotliwość w systemie podlega ciągłej fluktuacji; uzależnienie członu pomiarowo-porównawczego regulatorów napięcia od częstotliwości powoduje zwiększenie fluktuacji zmian napięcia. Z drugiej strony fluktuacja częstotliwości w normalnych warunkach pracy systemu jest bardzo mała, uzależnienie zatem regulatorów napięcia od częstotliwości praktycznie nie wpływa na fluktuacje napięcia w węzłach systemu.Korzystny wpływ uzależnienia działania regulatorów od zmian częstotliwości może uwidocznić się jednak w awaryjnych przypadkach pracy systemu.

W literaturze technicznej - zarówno krajowej, jak i zagranicznej - znajdujemy wprawdzie wycinkowe opracowania poświęcone omawianemu zagadnieniu, które nie zawierają jednak gruntownej analizy problemu. Warto dodać, że autorzy niektórych publikacji [30] wysuwają argumenty przemawiające za uzaleznieniem członu pomiarowo-porównawczego regulatora napięcia od częstotliwości, bądź dyskutują wpływ takiego uzależnienia [24. 25. 26]. Zaznacza się jednak [24, 25, 26], że w przypadku hydrogeneratorów wpływ zmian częstotliwości na człon pomiarowo-porównawczy regulatorów jest szczególnie niekorzystny z uwagi na możliwość częstego występowania znacznych przejściowych zwyżek częstotliwości. Są one tym dotkliwsze, gdy wzrostowi częstotliwości towarzyszy powiekszenie wartości zadanej układu regulacji napięcia, co w konsekwencji prowadzi do zwyżek napięcia generatorowego. Duże chwilowe zwyżki prędkości wirowania hydrogeneratora i odpowiadające im zwyżki częstotliwości, mogą wystąpić przy awaryjnych wyłączeniach linii przesyłowych wiążących hydrogenerator - obciążony mocą czynną - z systemem elektroenergetycznym. Zamknięcie dopływu wody do hydroturbiny przez regulator prędkości odbywa się z pewnym opóźnieniem, na skutek czego przepływ wody powoduje przejściowy rozbieg mas wirujących. Należy zaznaczyć, że w pewnych niekorzystnych przypadkach zwyżki częstotliwości mogą tutaj dochodzić do 100%.

W przypadku turbogeneratorów, przy których nie występują duże zwyżki częstotliwości, wpływ niewielkich zmian częstotliwości na wartość wzorcową może być w niektórych przypadkach korzystny. Korzystny wpływ częstotliwości na człon pomiarowo-porównawczy, w sensie zmniejszenia wartości wzorcowej przy obniżaniu częstotliwości, może wystąpić [26]

a. W systemie elektroenergetycznym o małej rezerwie mocy czynnej w czasie przeciążenia systemu mocą czynną. Na skutek przeciążenia maleje częstotliwość i w wyniku interwencji regulatora napięcia maleje napięcie ($\frac{\Delta U}{U_{zn}} \cdot \frac{f_{zn}}{\Delta f} \approx 0,50 \dots 1,52$). Zmalenie napięcia prowadzi do obniżenia poboru mocy czynnej i na ogół również do zmalenia mocy biernej w systemie, co przyczynia się do odciążenia i w konsekwencji zrównoważenia bilansu mocy czynnej.

- b. W przypadku zasilania dużej grupy odbiorów o charakterze oporowym (piece, urządzenia ogrzewcze, oświetlenie). W tym przypadku przebieg charakterystyk mocy pobieranej P = F(f) == const jest niekorzystny ze względu na warunki pracy regulatora turbiny z powodu malejącej hiperbolicznie statycznej charakterystyki momentu obciążenia (rys. 3). Zbyt małe nachylenie charakterystyki momentu regulacyjnego m = M - M == F(f) w punkcie pracy ustalonej może przyczynić się do zaniejszenia zapasu stabilności regulatora prędkości turbiny. Przez uzależnienie członu pomiarowo-porównawczego od częstotliwości otrzymujemy zwiększenie stromości charakterystyki $M_r = F(f)$, jak zaznaczono linią przerywaną na rys. 3.
- c. W systemie elektroenergetycznym, zawierającym większość nieskompensowanych odbiorów asynchronicznych. Przez właściwe uzależnienie napięcia od częstotliwości otrzymuje się w takim systemie możliwość zmniejszenia strat przesyłu energii.

Omawiane wyżej zagadnienia były również przedmiotem własnych opracowań [2, 9, 10].

Zmiany częstotliwości występujące w normalnych warunkach pracy systemu =1ektroenergetycznego mają charakter stochastyczny. źródłem tych zmian jest ciągła fluktuacja pobieranej mocy czynnej. Zmiany te są stosunkowo powolne i staramy się je tak wyregulować, aby nie przekraczały zakresu dopuszczalnych odchyleń. Aczkolwiek w czasie procesu regulacyjnego występuje współdziełanie układów regulacji częstotliwcści i napięcia, mozna wyodrębnić w rozważaniach przebiegi regulacji częstotliwości, które odbywają się w dłuższym czasie - z uwagi na duże bezwładności urządzeń zasilania turbin - od przebiegów regulacji napięcia, zachodzących w znacznie krótszym czasie. W związku z tym dominujący czasokres trwania przebiegów regulacji częstotliwości odbywa się w quasi ustalonym stanie napięcia. Przy rozpatrywaniu zagadnień regulacji częstotliwości można zatem przyjąć, że układ samoczynnej regulacji napięcia pracuje w stanie ustalonym.

Przy nagłych zmianach obciążenia czynnego,występują regulacyjne przebiegi przejściowe, aż do momentu ustalenia się nowego stanu równowagi pracy systemu. W tym nowym quasi ustalonym stanie pracy, częstotliwość i napięcie osiągną inne średnie wartości niż przed powstaniem zakłócenia.

Rozważania zawarte w niniejszej pracy ograniczają się do analizy współzależności zmian częstotliwości i napięcia – ściśle ich wartości średnich – w wyżej scharakteryzowanych stanach quasi ustalonych, traktowanych jako stany ustalone.

W krajowym systemie elektroenergetycznym generatory synchroniczne są wyposażone w regulatory napięcia różnych firm wytwórczych. Duża ich liczba posiada jeszcze regulatory elektromechaniczne, które wykazują uzależnienie działania członu pomiarowoporównawczego od zmian częstotliwości. Pokaźna liczba generatorów posiada regulatory elektromagnetyczne bez strefy nieczułości, których wartość zadana napięcia regulowanego jest zależna proporcjonalnie od zmian częstotliwości (np. regulatory EPA produkcji radzieckiej). Coraz szerzej stosowane są w kraju regulatory typu RNGT produkcji Instytutu Energetyki w Gdańsku. Regulatory te są nowoczesnymi rozwiązaniami, zapewniającymi bardzo dobre wskaźniki jakości regulacji. Część tych regulatorów RNGT, przeznaczonych do generatorów średniej mocy,wykazują pewną zależność działania członów pomiarowo-porównawczych od częstotliwości. Są to regulatory w których wyzyskano w członach pomiarowo-porównawczych liniowe i nieliniowe elementy.Dla turbogeneratorów największych mocy zastosowano w kraju układy regulacji napięcia produkcji zagranicznej (np. na generatorach 120 MW dostawy angielskiej) typu VTSR, których człony pomiarowe zawierają mostki z elementów nieliniowych o charakterystyce niezależnej od częstotliwości, bądź zastosowano nowoczesne układy regulacji typu RNGT produkcji Instytutu Energetyki W Gdańsku (np. RNGT-71 dla generatorów 120 MW produkcji krajowej), których człony pomiarowo-porównawcze wykazują mały wpływ częstotliwości na ich charakterystyki sterowania (wartość zadana pochodzi z elektromagnetycznych stabilizatorów o skompensowanym wpływie częstotliwości).

Z uwagi na bardzo wygodną realizację wartości zadanej przez wyzyskanie diod Zenera bądź rezystancji ceramicznych przy nieliniowych charakterystykach w członie pomiarowo-porównawczym, występuje tendencja budowy członów pomiarowo-porównawczych regulatorów napięcia dla turbozespołów dużych mocy o charakterystykach od częstotliwości niezależnych.

Zanim przejdziemy do szczegółowych rozważań, zajmiemy się wpierw ogólną fizykalną interpretacją zagadnienia.

Zmiana częstotliwości w systemie elektroenergetycznym wywołuje zmianę pobieranej mocy czynnej i biernej,zgodnie z częstotliwościowymi charakterystykami odbioru [13, 14] oraz wpływa na reaktancje wzdłużną i poprzeczną – poszczególnych elementów układu sieciowego. Zmiany te wpływają w konsekwencji na spadki 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 statycznych odbioru [11, 12] – co również wpływa na spadki napięcia występujące na poszczególnych elementach układu sieciowego. Na zmianę częstotliwości reagują ponadto, w dużej liczbie przypadków, człony pomiarowo-porównawcze regulatorów napięcia generatorów i kompensatorów – odpowiednio do charakterystyki U = F(f) regulatora.

Widzimy zatem, że zmiana częstotliwości w systemie elektroenergetycznym wywołuje kilka wzajemnie powiązanych i nakładających się związków. Dla łatwiejszego przeprowadzenia ich analizy wprowadzimy w pierwszej fazie rozważań pewne uproszczenia, polegające na wyodrębnieniu poszczególnych związków.

Metoda użyta przy rozpatrywaniu omawianego problemu polega na analizie funkcjonalnych związków między współczynnikami względnego nachylenia odpowiednich charakterystyk statycznych.

Do analizy wykorzystano przeciętne wartości współczynników względnego nachylenia napięciowych i częstotliwościowych charakterystyk statycznych odbioru, jakie wyznaczono na podstawie pomiarów przeprowadzonych w krajowym systemie elektroenergetycznym [2]. Wnioski wynikające z przyjętego sposobu analizy pokrywają się z wynikami pomiarów, jakie przeprowadzono w krajowym systemie elektrocnergetycznym.

2. WSPÓŁZALEŻNOŚĆ ZMIAN CZĘSTOTLIWOŚCI I NAPIECIA W WĘŻLE PRACY RÓWNOLEGŁEJ GENERATORÓW

Na rys. 1a przedstawiono schemat blokowy układu regulacji napięcia generatora synchronicznego, W członie porównawczym następuje porównanie napięcia U na zaciskach generatora, mierzonego za pomocą przekładników napięciowych, z napięciem zadanym Uz. Odchyłka napięcia (Uz - U) po wzmocnieniu w kaskadzie wzmacniacza regulatora oddziałuje na generator w ten sposób, aby zmniejszyć zaistniałą odchyłkę. Człon podatnego sprzężenia zwrotnego zapewnia regulatorowi stabilność i pożądane charakterystyki dynamiczne. Wszystkie regulatory napięcia, niezależnie od ich budowy, można sprowadzić do takiego schematu blokowego. Przy wzmocnieniu kaskady dążącym do nieskończoności odchyłka napięcia maleje do zera. Jeśli wzmocnienie jest równe nieskończoności, mamy do czynienia z regulatorem astatycznym. Przy wzmocnieniu mniejszym od nieskończoności regulator jest statyczny i powoduje niewielkie malenie napięcia na zaciskach generatora w funkcji prądu obciążenia generatora.

Dla uzyskania dużej dokładności regulacji pożądane są regulatory bardzo zbliżone do astatycznych lub astatyczne. praktyce można założyć, że większość regulatorów posiada właściwość zbliżoną do astatycznych. Dalsze rozważania będą oparte na takim założeniu.

Mając na uwadze, że przyłączenie odbioru bezpośrednio do zacisków generatora, o napięciu regulowanym na stałą wartość występuje jedynie w szczególnych przypadkach – trzebe w ogólnym przypadku uwzględnić skomplikowany system elektroenergetyczny, który narzuca warunki dla charakterystyki napięcia generatora w funkcji obciążenia, odbiegającej od stałości napięcia na zaciskach.

Podstawowym warunkiem stabilnego rozpływu mocy biernej generatorów przyłączonych do pracy równoległej w węźle jest opadająca charakterystyka napięcia w węźle pracy równoległej w funkcji prądu biernego przy stałym prądzie czynnym

$$\binom{\partial U}{\partial I_q}_{p = \text{const}} < 0$$
 (1a)

Podobne zależności występują przy rozpatrywaniu stabilnego rozpływu mocy czynnej współpracujących generatorów

$$\left(\frac{\partial P}{\partial f}\right) < 0$$
 (1b)

Na rozpływ mocy czynnej wpływają regulatory częstotliwości, których działanie można na ogół rozpatrywać niezależnie od regulatorów napięcia. Analiza działania regulatorów częstotliwości nie wchodzi w zakres niniejszej pracy.

Równomierny rozpływ mocy biernej na współpracujące generatory otrzymuje się wtedy, gdy statyzm napięcia w węźle pracy równoległej

$$S = \left(\frac{\partial U}{\partial T_q}\right)_{I_p} = \text{const} \cdot \frac{\mathcal{B}_{\text{Zn}}}{\mathcal{U}_{g_{\text{Zn}}}} < 0 \qquad (1c)$$

jest jednakowy dla wszystkich jednostek prądotwórczych przyłączonych do węzła pracy równoległej.

Uwzględniając istnienie w systemie elektroenergetycznym elektromechanicznych regulatorów napięcia, które wykazują strefę nieczułości, co powoduje, że charakterystyka napięcia regulowanego w funkcji prądu obciążenia przedstawia nie linię jednoznaczną lecz pasmo (rys. 1b) - przyjmuje się przeciętnie statyzm napięcia w węźle pracy równoległej o wartości zbliżonej do S = -0,05. Przy takim statyzmie rozpływ mocy biernej na współpracujące równolegle jednostki prądotwórcze nie wykazuje zbyt dużej rozbieżności ΔQ_4 (rys. 1b), mimo wpływu przeciętnie występującej strefy nieczułości regulatorów elektromechanicznych.

Pożądane uzaleźnienie napięcia generatora od prądu obciążenia otrzymuje się w regulatorze napięcia za pomocą układu kompoundacji członu pomiarowego, którego działanie można sprowa-







Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji napięcia generatora synchronicznego (a), wpływ strefy nieczułości na rozpływ mocy biernej na współpracujące równolegle generatory (b), ideowy schemat układu kompoundacji członu pomiarowego (c) dzić do uzależnienia napięcia zadanego w regulatorze od prądu obciążenia generatora.

Rys. 1c przedstawia typowy układ kompoundacji członu pomiarowego, w którym napięcie regulowane U sumuje się geometrycznie ze składową napięcia kompoundacji

$$\hat{\mathbf{U}}_{k} = \hat{\mathbf{I}}\hat{\mathbf{Z}}_{k} = (\mathbf{I}_{p} - \mathbf{j}\mathbf{I}_{q}) \quad (\mathbf{R}_{k} + \mathbf{j}\mathbf{X}_{k}) = (\mathbf{I}_{p}\mathbf{R}_{k} + \mathbf{I}_{q}\mathbf{X}_{k}) + \mathbf{j}(\mathbf{I}_{p}\mathbf{X}_{k} - \mathbf{I}_{q}\mathbf{R}_{k}) \quad (2a)$$

Napięcie $|\hat{U}| = |\hat{U}| + \hat{U}_k|$ jest utrzymywane na stałej wartości w regulatorze astatycznym.

Uwzględniając, że składowa napięcia kompoundacji wynosi przeciętnie ok. 5% napięcia generatora U, można pominąć w sumie geometrycznej (U + U_k) składową bierną napięcia kompoundacji. Zatem

$$U_{p} \cong U_{g} + I_{p} R_{k} + I_{q} X_{k}$$
(2b)

Uwzględniając, że napięcie U_p jest utrzymywane na stałej wartości przez regulator astatyczny, napięcie na zaciskach generatora

$$U_{g} = U_{p} - I_{p} R_{k} - I_{q} X_{k}$$
(2c)

Ujemne nachylenie charakterystyki napięcia $U_g = F(I_q)$ otrzymuje się przy nastawieniu dodatniej reaktancji w impedancji Z_k kompoundacji członu pomiarowego. Rezystancję R_k oraz reaktancję można nastawić za pomocą doboru elementów układu kompoundacji (zwykle są to rezystancje rzeczywiste i indukcyjności wzajemne) oraz za pomocą doboru korelacji fazy przekładnika prądowego i fazy napięcia przekładnika napięciowego. Rezystancja R_k bądź reaktancja X_k nie musi być w ogólnym przypadku utworzona w członie kompoundacji przez rezystancję rzeczywistą, bądź reaktancję rzeczywistą zasilaną z przekładnika prądowego.

Przyporządkowanie nazwy rezystancji i reaktancji składowym impedancji \hat{Z}_{l} ma znaczenie analityczne, wynikające z korelacji wpływu wektora prądu generatora na wektor napiącia regulowanego U_p. Fakt ten ma podstawowe znaczenie przy późniejszej dyskusji wpływu zmian częstotliwości na własności regulatora. W związku z tym, że regulatorowi przypada zadanie nie tylko ustalania pożądanego napięcia lecz również zadanie stabilizacji rozpływu mocy biernej - dano układowi regulacji nazwę bardziej ogólną; układu regulacji wzbudzenia.

Jeśli między generatorem a węzłem pracy równoległej jest włączony transformator (np. transformator blokowy), wówczas jego reaktancja zwarcia wpływa również na statyzm napięcia w węźle pracy równoległej (rys. 2a).

Napięcie w węźle pracy równoległej

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_{p} - \mathbf{I}_{p}(\mathbf{R}_{k} + \mathbf{R}_{T}) - \mathbf{I}_{q}(\mathbf{X}_{k} + \mathbf{X}_{T})$$
(2d)

gdzie:

R_m, X_m - rezystancja i reaktancja zwarcia transformatora.

Uwzględniając, że względne napięcie zwarcia transformatora blokowego jest rzędu 0,1, pożądany statyzm napięcia w węźle pracy równoległej 0,05 otrzyma się przy ujemnej względnej reaktancji $X_k = 0,05$. Podobnie można uwzględnić ewentualną impedancję linii przesyłowej, łączącej generator z węzłem pracy równoległej.

Rys. 2b przedstawia układ zastępczy dwóch generatorów zasilających węzeł pracy równoległej, w którym w miejsce generatorów tkwią siły elektromotoryczne U_p połączone z węzłem pracy równoległej impedancjami

$$R_{r} = R_{k} + R_{T}$$
$$X_{r} = X_{k} + X_{T}$$

Na rys. 2c przedstawiono zwinięty układ zastępczy, będący podstawą do dalszej analizy.

Napięcie w węźle pracy równoległej

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_{\mathbf{p}} - \mathbf{I}_{\mathbf{p}} \mathbf{R}_{\mathbf{r}} - \mathbf{I}_{\mathbf{q}} \mathbf{X}_{\mathbf{r}}$$
(2e)





b)



c)



Rys. 2. Układ zastępczy dwó

dwóch generatorów zasilających węzeł pracy równoległej



Rys. 3. Charakterystyka momentu turbiny M_t , momentu obciążenia M_o i momentu regulacyjnego $M_r = M_t - M_o = F(f)$



Rys. 4. Wykresy zależności $\beta_{u_{zn}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{zn}^{(k)})$. Wartość odcię-

tej punktu początkowego każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości. Większe współczynniki mocy od współczynnika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru

można przedstawić w funkcji mocy czynnej P i biernej Q

 $U = U_p - \frac{P}{U} \cdot R_r - \frac{Q}{U} \cdot X_r$ (2f)

Frzy odniesieniu do napięcia i pozornej mocy znamionowej generatora zastępczego o sumarycznej mocy pozornej; względna reaktancja X. jest równa ujemnemu statyzmowi S. w węźle pracy równoległej. Jeśli statyzmy $S_1 i S_2$ w węźle pracy równoległej obu generatorów, względne rezystancje $R_{r_1} i R_{r_2}$ oraz napięcia U_{p1} i U_{p2} - są jednakowe, wówczas wypadkowy statyzm S i względne wartości R_r i U_p układu zastępozego pozostają niezmienione.

Charakterystyka U = F(Q) przy P = const jest krzywoliniowo opadająca, podczas gdy charakterystyka U = $F(I_q)$ przy I_p =const ma przebieg prostoliniowo opadający. Dla małych przedziałów zmienności Q krzywoliniowa charakterystyka może być również rozpatrywana jako prostoliniowa.

Zmienność napięcia w węźle pracy równoległej spowodowana statyzmem napięcia koniecznym dla stabilnego rozpływu mocy biernej jest niekorzystna z punktu widzenia pożądanej stałości napięcia odbiorów energetycznych zasilanych z węzła. Zmienność tę można skompensować za pomocą ujemnej rezystancji R_r, której wartość można nastawiać w regulatorze przez dobór rezystancji R_r.

Przyjmując, że przy normalnym współczynniku mocy odbioru napięcie w węźle pracy równoległej ma mieć przebieg sztywny, niezależny od prądu obciążenia

 $U = F(I) = U_n (przy \cos \varphi_n)$

otrzymuje się wartość pożądanej rezystancji R_k z równania

$$\frac{\mathbf{I}_{g_{g_n}}}{\mathbf{U}_{g_{g_n}}} \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{k}} = + \mathbf{S} \cdot \mathbf{t}_{g_{g_n}}$$
(3a)

Istnieje również możliwość kompensacji statyzmu w węźle pracy równoległej w inny sposób, za pomocą grupowej kompoundacji członu pomiarowego generatorów, która polega na zasilaniu impedancji kompondacji prądem sumarycznym generatorów [24]. Grupowa kompoundacja jest rzadko stosowana i nie uwzględnia się jej w dalszym ciągu tej pracy. Stałość napięcia w węźle pracy równoległej – przy normalnym współczynniku mocy – jest pożądana wtedy, gdy bezpośrednio z węzła pracy równoległej są zasilane odbiory energetyczne.Jeśli poza odbiorami w węźle pracy równoległej występuje jednocześnie przesył energii linią przesyłową, to wówczas na krańcu odbiorczym układu przesyłowego przewiduje się transformator z regulacją napięcia pod obciążeniem. Regulacja transformatora zapewnia stałość napięcia odbiorów przyłączonych na krańcu odbiorczym.

Jeśli nie potrzeba ustalenia napięcia w węźle pracy równole-"lej, a tylko zależy na stałości napięcia na krańcu odbiorczym bez transformatora z regulacją napięcia, to wtedy dobiera się odpowiednią rezystancję R_k w układzie kompoundacji członu pomiarowego regulatorów napięcia generatorów z równania

$$R_{k} \cdot \frac{I_{g_{2n}}}{U_{g_{2n}}} = (S + X \frac{I_{g_{2n}}}{U_{g_{2n}}}) t g \varphi_{n} - R \frac{I_{g_{2n}}}{U_{g_{2n}}}$$
(3b)

gdzie:

X, R - reaktancja i rezystancja układu przesyłowego, I J - prąd i napięcie znamionowe zastępczego generatora sumarycznej mocy.

W celu rozpatrzenia zależności napięcia w węźle pracy równoległej od zmian częstotliwości trzeba uwzględnić zależności U_p, R_r, X_r od częstotliwości. Zależność U_p od częstotliwości wynika ze zamierzonego bądź niezamierzonego rozwiązania konstrukcyjnego członu wartości zadanej regulatora. Zależność R_r od częstotliwości wynika ze sposobu technicznej realizacji elementu R_k w układzie kompoundacji członu pomiarowego. Najczęściej R_k jest zrealizowane za pomocą indukcyjności wzajemnej o reaktancji zależnej od częstotliwości. Zależność X_r od częstotliwości wynika zarówno z układu kompoundacji jak i z naturalnej zależności od częstotliwości reaktancji zwarcia transformatora blokowego. Wykorzystując równanie (2f) oraz uwzględniając funkcje U $_{\rm p}({\rm f})$ R $_{\rm r}({\rm f}),$ X (f) otrzymuje się dla małych przyrostów częstotliwości

$$dU = dU_{p} - \frac{R_{r}}{U} dP - \frac{X_{r}}{U} dQ - \frac{P}{U} \left(\frac{dR_{r}}{df}\right) df + \frac{Q}{U} \left(\frac{dX_{r}}{df}\right) df + \left(\frac{R_{r}}{U^{2}}P + \frac{X_{r}}{U^{2}}Q\right) dU$$

stąd

$$dU = \left\{ \begin{bmatrix} dU_{p} - \frac{P}{U} \left(\frac{dR_{r}}{df} \right) df - \frac{Q}{U} \left(\frac{dX_{r}}{df} \right) df \end{bmatrix} + \frac{R_{r}}{U} dP + \frac{X_{r}}{U} dQ \right\} \cdot \frac{1}{1 - \frac{R_{r}}{U^{2}} P - \frac{X_{r}}{U^{2}} Q}$$

wgzlędnie

$$\frac{dU}{d\vec{r}} = \left\{ \begin{bmatrix} \frac{dU}{d\vec{r}} & -\frac{P}{U} & \frac{dR_{r}}{d\vec{r}} - \frac{Q}{U} & \frac{dX_{r}}{d\vec{r}} \end{bmatrix} + \\ - \begin{bmatrix} \frac{R_{r}}{U} \cdot \frac{dP}{d\vec{r}} + \frac{X_{r}}{U} \cdot \frac{dQ}{d\vec{r}} \end{bmatrix} \right\} \cdot \frac{1}{1 - \frac{R_{r}}{U^{2}} P - \frac{X_{r}}{U^{2}} Q}$$
(4a)

Po wprowadzeniu jednostek względnych w odniesieniu do warunków normalnych – warunki normalne mogą odbiegać od warunków znamionowych – w węźle pracy równoległej, otrzymuje się

$$\frac{d\mathbf{U}^{*}}{d\mathbf{f}^{*}} = \mathbf{k}_{r} + \mathbf{S}_{q_{n}} \cdot \frac{d\mathbf{Q}}{\mathbf{g}_{zn}} \cdot \frac{1}{d\mathbf{f}^{*}} + \mathbf{S}_{p_{n}} \cdot \frac{d\mathbf{P}}{\mathbf{p}_{zn}} \cdot \frac{1}{d\mathbf{f}^{*}} \quad (4b)$$

gdzie:

$$\mathbf{U}^* = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{U}_n}; \quad \mathbf{f}^* = \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{f}_n}; \quad \mathbf{U}_p^* = \frac{\mathbf{U}_p}{\mathbf{u}_n}$$

$$\mathbf{k}_{\mathbf{r}} = \left\{ \frac{\mathrm{d}\mathbf{U}_{\mathbf{p}}^{*}}{\mathrm{d}\mathbf{f}^{*}} + \left[\frac{\mathrm{d}\mathbf{S}}{\mathrm{d}\mathbf{f}^{*}} \mathrm{t}\mathbf{g}\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{n}} - \frac{1}{\mathbf{R}_{\mathbf{r}}} \frac{\mathrm{d}\mathbf{R}_{\mathbf{r}}}{\mathrm{d}\mathbf{f}^{*}} \left(\mathbf{R}_{\mathbf{r}} \frac{\mathbf{I}_{\mathbf{g}_{\mathbf{2n}}}}{\mathbf{U}_{\mathbf{g}_{\mathbf{2n}}}} \right) \right] \left(\frac{\mathbf{U}_{\mathbf{g}_{\mathbf{2n}}}}{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}} \right)^{2} \frac{1}{\varphi} \cos\boldsymbol{\varphi}_{\mathcal{G}_{\mathbf{2n}}} \right\} \frac{1}{1-\varphi}$$

$$(4c)$$

$$S_{q_n} = \frac{\frac{U_{g_{2n}}}{U_n} \sin \varphi_{g_{2n}}}{1 - a} - \frac{U_{g_{2n}}}{1 - a}$$

 statyzm napięcia w węźle pracy równoległej względem mocy biernej (4d)

$$S_{\mathbf{p}_{n}} = \frac{R_{\mathbf{r}} \frac{\mathbf{I}_{\mathbf{z}n}}{\mathbf{U}_{\mathbf{g}_{\mathbf{z}n}}} \left(\frac{\mathbf{g}_{\mathbf{z}n}}{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}}\right)^{2} \cos \varphi_{\mathbf{g}_{\mathbf{z}n}}}{1 - a}$$

 statyzm napięcia w węźle pracy równoległej względem mocy czynnej (4e)

przy czym

$$a = (-S \cdot tgq_n + R_r \frac{I_{g_{2n}}}{U_{g_{2n}}}) \left(\frac{g_{2n}}{U_{n}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\varrho} \cdot \cos\varphi_{g_{2n}}$$
(4f)

$$g = \frac{\frac{g_{zn}}{g}}{\frac{p_{g}}{g}} - wsp6lczynnik rezerwy mocy czynnej.$$

Przy zupełnej kompensacji statyzmu w węźle pracy równoległej generatorów

a = 0

oraz

$$k_{\mathbf{r}} = \frac{dU_{\mathbf{p}}^{*}}{df^{*}} + \left[\frac{dS}{df^{*}} - \frac{S}{R_{\mathbf{r}}}\frac{dR_{\mathbf{r}}}{df^{*}}\right] \left(\frac{g_{zn}}{U_{n}}\right)^{2} \cdot tg\varphi_{n} \cdot \frac{1}{\varrho} \cdot \cos\varphi_{g_{zn}} \quad (4g)$$

$$S_{q_n} = S \left(\frac{U_{g_{2n}}}{U_n}\right)^2 \sin q_{g_{2n}}$$
 (4h)

$$S_{p_n} = S(\frac{v_{g_{2n}}}{v_n}) tgq_n \cdot \cos q_{g_{2n}}$$
(41)

Zmienność napięcia w węźle pracy równoległej generatorów określa równanie (4a). Współczynnik k_r ujmuje podatność regulatora na zmienność częstotliwości.

Decydujący wpływ na współczynnik k_r wywiera podatność członu pomiarowo-porównawczego na zmienność częstotliwości określona przez składnik

$$k_{\mathbf{r}} \approx k_{\mathbf{p}} = \frac{dU_{\mathbf{p}}}{d\mathbf{r}} \cdot \frac{\mathbf{f}_{\mathbf{n}}}{U_{\mathbf{n}}}$$
 (4j)

Dalsze rozważania będą oparte na takim założeniu. Współzależność zmian częstotliwości i napięcia w węźle pracy równoległej generatorów można zatem przedstawić funkcją

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}(\mathbf{f}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}) \tag{5}$$

w które, związek funkcyjny jest uzależniony od regulatorów napięcia generatorów zasilających węzeł pracy równoległej.

Różniczkując tę funkcję względem częstotliwości otrzymuje się

$$\frac{dU}{df} = \frac{\partial U}{\partial f} + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{dQ}{df} + \frac{\partial U}{\partial F} \cdot \frac{dP}{df}$$
(6)

Z drugiej strony występuje zależność od zmian częstotliwości mocy biernej i czynnej odbieranej z węzła. Wpływ zmian częstotliwości na pobieraną moc bierną i czynną jest podwójny [13, 14]. Oprócz bezpośredniego wpływu częstotliwości na pobieraną moc, występuje jednocześnie wpływ pośredni, wynikający ze zmiany napięcia wywołanej zmianą częstotliwości. A zatem wielkości dQ/df i dP/df można określić następująco:

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

$$\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dT}} = \frac{\mathrm{OP}}{\mathrm{OT}} + \frac{\mathrm{OP}}{\mathrm{OU}} \cdot \frac{\mathrm{dU}}{\mathrm{dT}}$$
(8)

Uwzględniając równania (7) i (8) można zależność (6) zapisać w postaci

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{dU}{\partial t} \right) + + \frac{\partial U}{\partial P} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{dU}{dt} \right)$$
(9)

Po dokonaniu prostych przekształceń otrzymuje się

$$\frac{\partial U}{\partial T} \left[1 - \left(\frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial U} \right) \right] =$$
$$= \frac{\partial U}{\partial T} + \frac{\partial U}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\partial U}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial T}$$
(10)

stąd wynika, że

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}\mathbf{f}} = \frac{\frac{\partial U}{\partial \mathbf{f}} + \frac{\partial U}{\partial \mathbf{Q}} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{f}} + \frac{\partial U}{\partial \mathbf{P}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \mathbf{f}}}{1 - \frac{\partial U}{\partial \mathbf{Q}} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{U}} - \frac{\partial U}{\partial \mathbf{P}} \cdot \frac{\partial P}{\partial \mathbf{U}}}$$
(11)

Omówienia wymagają obecnie wielkości wchodzące do wyprowadzonego wyżej wzoru. Jak wiadomo [2, 13, 14, 11, 12], częstotliwościowe i napięciowe charakterystyki statyczne odbioru można, w określonych zakresach odchyleń częstotliwości i napięcia aproksymować linią prostą. Możliwość zastosowania tutaj aproksymacji liniowej pozwala na posługiwanie się tzw.współczynnikami względnego nachylenia charakterystyk:

- dla charakterystyk P = F(f) i Q = F(f)

$$\alpha_{f_n} = \frac{\hat{\theta}P}{\partial T} \cdot \frac{f_n}{P_n} \qquad \beta_{f_n} = \frac{\partial Q}{\partial T} \cdot \frac{f_n}{Q_n}$$
(12)

- dla charakterystyk P = F(U) i Q = F(U)

$$\boldsymbol{\alpha}_{U_n} = \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{U_n}{P_n} \quad \boldsymbol{\beta}_{U_n} = \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{U_n}{Q_n}$$
(13)

Przedstawione wyżej współczynniki odniesione są do rzeczywistych parametrów energii elektrycznej (f_n, U_n) w warunkach normalnej pracy odbioru.

Przekształcając wyrażenia (12) i (13) otrzymujemy:

$$\frac{\partial P}{\partial f} = \alpha_{f_n} \cdot \frac{P_n}{f_n} \qquad \frac{\partial Q}{\partial f} = \beta_{f_n} \cdot \frac{Q_n}{f_n} \qquad (14)$$
$$\frac{\partial P}{\partial U} = \alpha_{U_n} \cdot \frac{P_n}{U_n} \qquad \frac{\partial Q}{\partial U} = \beta_{U_n} \cdot \frac{Q_n}{U_n} \qquad (15)$$

Jak już zaznaczono, na zmianę częstotliwości reagują również regulatory napięcia, a ściślej – ich człony pomiarowo-porównawcze. Zależność U = F(f) regulatorów napięcia jest w przybliżeniu liniowa, a jej współczynnik względnego nachylenia można określić wzorem:

$$\mathbf{k}_{\mathbf{r}_{n}} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{f}} \cdot \frac{\mathbf{f}_{n}}{\mathbf{U}_{n}}$$
(16)

stad

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{f}} = \mathbf{k}_{\mathbf{r}_{\mathbf{n}}} \cdot \frac{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}}{\mathbf{f}_{\mathbf{n}}}$$
(17)

Wielkości 9U/00 i 0U/0P wchodzące do równania (11) określa się za pomocą statyzmu napięcia w węźle pracy równoległej względem mocy biernej [p. wzór (4d) (4h)] oraz odpowiednio względem mocy czynnej [p. wzór (4e) (4i)]

$$S_{q_n} = \frac{\partial U}{\partial \Omega} \cdot \frac{\mathcal{E}_{zn}}{U_n}$$
(18)

$$S_{p_n} = \frac{9U}{\partial P} \cdot \frac{P_{g_{2n}}}{U_n}$$
(19)

stad

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = S_{q_n} \cdot \frac{U_n}{g_{g_n}}$$
 (20)

$$\frac{\partial U}{\partial P} = S_{p_n} \cdot \frac{U_n}{P_{g_{2n}}}$$
(21)

Zalezność U = F(f) w węźle pracy równoległej generatorów jest w przybliżneju liniowa. Współczynnik względnego nachylenia tej zależności wyraża się wzorem

$$k_n = \frac{dU}{dT} \cdot \frac{T_n}{U_n}$$
(22)

stad

$$\frac{d\mathbf{U}}{d\mathbf{f}} = \mathbf{k}_{n} \cdot \frac{\mathbf{U}_{n}}{\mathbf{f}_{n}}$$
(23)

Podstawiając obecnie do wzoru (11) wyrażenia (14), (15), (17), (20), (21) i (23) otrzymuje się

$$k_{n} \cdot \frac{U_{n}}{I_{n}} = \frac{k_{r_{n}} \cdot \frac{U_{n}}{I_{n}} + S_{q_{n}} \frac{U_{n}}{g_{g_{2n}}} \cdot \mathcal{E}_{I_{n}} \frac{Q_{n}}{I_{n}} + S_{p_{n}} \frac{U_{n}}{P_{g_{2n}}} \cdot \alpha_{I_{n}} \frac{P_{n}}{I_{n}}}{1 - S_{q_{n}} \frac{U_{n}}{g_{g_{2n}}} \cdot \beta_{U_{n}} \frac{Q_{n}}{U_{n}} - S_{p_{n}} \frac{P_{n}}{U_{n}} \cdot \alpha_{U_{n}} \cdot \frac{P_{n}}{P_{g_{2n}}}}$$
(24)

- a po dokonaniu prostych przekształceń

$$\mathbf{k}_{n} = \frac{\mathbf{k}_{r_{n}} + \mathbf{S}_{q_{n}}}{1 - \mathbf{S}_{q_{n}} \frac{\mathbf{P}_{n} + \mathbf{g}_{q_{n}}}{\mathbf{P}_{g_{zn}} + \mathbf{g}_{q_{zn}}} \cdot \mathbf{\beta}_{\mathbf{f}_{n}} + \mathbf{S}_{p_{n}} \frac{\mathbf{P}_{n}}{\mathbf{P}_{g_{zn}}} \cdot \mathbf{\alpha}_{\mathbf{f}_{n}}}{1 - \mathbf{S}_{q_{n}} \frac{\mathbf{P}_{n} + \mathbf{g}_{q_{n}}}{\mathbf{P}_{g_{zn}} + \mathbf{g}_{q_{g_{zn}}}} \cdot \mathbf{\beta}_{\mathbf{U}_{n}} - \mathbf{S}_{p_{n}} \frac{\mathbf{P}_{n}}{\mathbf{P}_{g_{zn}}} \cdot \mathbf{u}_{n}}}$$
(25)

- stąd ostatecznie

$$k_{n} = \frac{k_{r_{n}} + \frac{1}{\varrho} \left(S_{q_{n}} \cdot \beta_{f_{n}} \cdot \frac{tg\varphi_{n}}{tg\varphi_{g_{2n}}} + S_{p_{n}} \cdot \alpha_{f_{n}} \right)}{1 - \frac{1}{\varrho} \left(S_{q_{n}} \cdot \beta_{U_{n}} \cdot \frac{tg\varphi_{n}}{tg\varphi_{g_{2n}}} + S_{pn} \cdot \alpha_{U_{n}} \right)}$$
(26)

gdzie

$$Q = \frac{B_{gn}}{P_n} - współczynnik rezerwy mocy czynnej.$$

W efekcie końcowym otrzymano zatem nową postać wzoru, który pozwala w sposób prosty na przeprowadzenie analizy ilościowej współzależności zmian częstotliwości i napięcia w węźle pracy równoległej generatorów.

Jeśli z węzła pracy równoległej generatorów zasilany jest wyłącznie odbiór oświetleniowy – wartości współczynników β_{n} , $\beta_{U_{n}}$ i α_{r} równe są zeru, a współczynnik $\alpha_{U_{n}} > 0$. Wzór (26) przyjnie wtedy postać

$$k_{n} = \frac{k_{r_{n}}}{1 - \frac{1}{\varrho} \cdot \alpha_{U_{n}} \cdot S_{p_{n}}}$$
(27)

Wynika stąd, że jeśli $k_{r_n} = 0$, to wtedy współczynnik $k_n = 0$. Oznacza to, że zmiana częstotliwości nie wywołuje zmian napięcia.

Współczynniki β i β_{U n} we wzorze (26) określają względną stromość tzw. naturalnych charakterystyk pobieranej mocy biernej. Po zastosowaniu kompensacji mocy biernej odbioru, względna stromość charakterystyk wzrasta.

Współczynniki względnego nachylenia charakterystyk – po kompensacji mocy biernej odbioru za pomocą baterii kondensatorów statycznych – określa się według wzoru [12, 14]

$$\beta_{U_n}^{(k)} = \frac{\beta_{U_n} \cdot tg\varphi_n - 2 \ (tg\varphi_n - tg\varphi_n^{(k)})}{tg\varphi_n} = \frac{9Q}{9U} \cdot \frac{U_n}{Q_n^{(k)}}$$
(28)

$$\beta_{f_n}^{(k)} = \frac{\beta_{f_n} \operatorname{tg} \varphi_n^{-(\operatorname{tg} \varphi_n^{-\operatorname{tg} \varphi_n^{(k)})}}{\operatorname{tg} \varphi_n^{(k)}} = \frac{\partial Q^{(k)}}{\partial f} \frac{f_n}{Q^{(k)}_n}$$
(29)

gdzie:

- Q^(k) moc bierna pobierana przez odbiór po zastosowaniu kompensacji,
- tgφ_n tangens kąta przesunięcia fazowego przed zastosowaniem kompensacji,
- $tg \varphi_n^{(k)} tangens kąta przesunięcia fazowego po zastosowaniu kompensacji.$

Współczynniki względnego nachylenia charakterystyk Q = F(U), P = F(U) i P = F(f) mają wartości dodatnie^{X)}.Natomiast wartość współczynnika względnego nachylenia charakterystyki Q = F(f)jest ujemna, w szczególnych przypadkach może mieć również wartość dodatnią [9].

Jeśli przyjąć, że współczynnik $\beta_n < 0$ oraz S < O i n n n S > 0 - to wówczas wzór (26) z uwzględnieniem znaków przyj-mie postać

$$\mathbf{k}_{n} = \frac{\mathbf{k}_{\mathbf{r}_{n}} + \frac{1}{\varrho} \left[|\mathbf{S}_{\mathbf{q}_{n}}| \cdot |\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{f}_{n}}| \cdot \frac{\mathbf{t}_{g} \boldsymbol{\varphi}_{n}}{\mathbf{t}_{g} \boldsymbol{\varphi}_{g_{2n}}} + \mathbf{S}_{\mathbf{p}_{n}} \cdot \boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{f}_{n}} \right]}{1 + \frac{1}{\varrho} \left[|\mathbf{S}_{\mathbf{q}_{n}}| \cdot \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{U}_{n}} \cdot \frac{\mathbf{t}_{g} \boldsymbol{\varphi}_{n}}{\mathbf{t}_{g} \boldsymbol{\varphi}_{g_{2n}}} - \mathbf{S}_{\mathbf{p}_{n}} \cdot \boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{U}_{n}} \right]}$$
(30)

x) wyjątek stanowi α_{f_n} dla odbiorów czynnych (oświetlenie, piece oporowe itp.). Dla tego przypadku $\alpha_{f_n} = 0$. Jeśli człon pomiarowo-porównawczy regulatora nie reaguje na zmiany częstotliwości, to współczynnik $k_{r_n} = 0$ i wtedy wzór (30) ma postać:

$$k_{n} = \frac{\frac{1}{\varrho} \left[|S_{q_{n}}| \cdot |\beta_{f_{n}}| \cdot \frac{tgq_{n}}{tgq_{g_{2n}}} + S_{p_{n}} \cdot \alpha_{f_{n}} \right]}{1 + \frac{1}{\varrho} \left[|S_{q_{n}}| \cdot \beta_{U_{n}} \cdot \frac{tgq_{n}}{tgq_{g_{2n}}} - S_{p_{n}} \cdot \alpha_{U_{n}} \right]}$$
(31)

Ze wzoru (31) wynika, że zmiana poboru mocy biernej wywołana zmianą napięcia wpływa na zmniejszenie wartości współczynni-

ka k_n, a zmiana poboru mocy czynnej na jej zwiększenie. Wykorzystując wzór (31) możemy przeprowadzić analizę współzależności zmian częstotliwości i napięcia w węźle pracy równoległej generatorów, jeśli regulator napięcia nie reaguje na odchylenia częstotliwości. tym celu trzeba także uwzględnić wzory (28) i (29). Można tu wykorzystać wyznaczone przez autora przeciętne wartości współczynników względnego nachylenia częstotliwościowych i napięciowych charakterystyk statycznych odbioru dla zakładów przemysłowych [2, 11, 12, 13, 14]^{x)}. W naszym przypadku zakładamy, że odbiory te są bezpośrednio zasilane z węzła pracy równoległej generatorów.

Na rys.4 i rys.5 podano wykresy zależności $\beta_{U_{2n}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)})$ oraz $\beta_{f_{2n}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)})$, natomiast na rys. 6 pokazano wykresy zależności $k_{2n} = F(\cos \varphi_{2n})$ przy założeniu, że współczynnik $k_{r} = 0$. Te ostatnie krzywe stanowią ilustrację możliwych – w danych warunkach – zmian napięcia, wywołanych zmianą częstotliwości, w węźle pracy równoległejgeneratorów.Z wykresów tych wynika, że wartość współczynnika k_{zn} nie przekracza 0,22. Z pomiarów, przeprowadzonych w kilkunastu węzłach pracy rów-

x)_{Współczynniki} te odniesione są do znamionowych parametrów energii elektrycznej (f_{zn}, U_{zn}).



Rys. 5. Wykresy zależności $\beta_{f_{am}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{m}^{(k)})$. Wartość od-

ciętej punktu początkowego każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości. Większe współczynniki mocy od współczynnika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru



Rys. 6. Wykresy zależności k = $F(\cos \varphi_{2n}^{(k)})$ - przy założeniu, że k = 0, S = -0,05, S = 0,04, $\cos \varphi_{5n}$ = 0,70 oraz p_{2n} - p_{2n}

noległej generatorów, otrzymano znacznie większe wartości -0,60 < k_{zn} < 1,15 (por. tabl. 1). Przyczyna takiej rozbieżności tkwi w wartościach współczynnika k większego od zera. Przy pomiarowym określeniu wartości tego współczynnika dla różnych typów regulatorów napięcia może być pomocny wzór (6), który po odpowiednich przekształceniach przyjmie postać:

$$k_{n} = k_{r_{n}} + \frac{1}{\varrho} \left(S_{q_{n}} \cdot \beta_{f, U_{n}} + S_{p_{n}} \cdot \alpha_{f, U_{n}} \right)$$
(32)

stad

$$\mathbf{k}_{\mathbf{r}_{n}} = \mathbf{k}_{n} - \frac{1}{\varrho} \left(\mathbf{S}_{\mathbf{q}_{n}} \cdot \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{f},\mathbf{U}_{n}} + \mathbf{S}_{\mathbf{p}_{n}} \cdot \boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{f},\mathbf{U}_{n}} \right)$$
(33)

gdzie:

 A_{f,U_n} - współczynnik względnego nachylenia charakterystyk Q = F(f,U), $\mathfrak{Q} = F(f,U),$ współczynnik względnego nachylenia charakterystyk P = F(f,U).

Wykorzystując wzór (33) można obliczyć wartość współczynni k_{r_n} , jeśli znane są wartości $\beta_{f,U_n}, \alpha_{f,U_n}$ i k_n oraz sta-mu S_q i S_p. W tym celu należy wpierw wyznaczyć drogą poka tyzmu Sg miarową charakterystyki Q = F(f,U), P = F(f,U) oraz U = F(f),a następnie określić ich współczymniki względnego nachylenia.

W tablicy 1 zestawiono wyznaczone w ten sposób wartości współczynników k_r dla najczęściej w energetyce krajowej stosowanych typów regulatorów napięcia.

Z tablicy 1 wynika, że wartości współczynników k poszcze-zn gólnych typów regulatorów napięcia dość znacznie się różnią i mieszczą w zakresie 0,0-1,0 w zależności o typów i pochodzenia.

Z wyprowadzonego już uprzednio wzoru (26) wynika, że zmiana napięcia wywołana zmianą częstotliwości zależy od szeregu czynników; wartości współczynnika k , charakteru odbioru, parametrów generatora oraz statyzmu napięcia w węźle pracy równoległej generatorów. Z porównania wykresów zależności k_{zn} = = $F(\cos \varphi_{zn}^{(k)})$ - rys. 6 i 7 - wyznaczonych dla określonych war-



Rys. 7. Wykresy zależności $k_{zn} = F(\cos\varphi_{zn}^{(k)}) - przy założeniu,$ że $k_{r} = 0,70, S_{q} = -0,05, S_{p} = 0,04, \cos\varphi = 0,70$ o r_{zn} $r_$

Tablica 1

Zestawienie wartości współczynników k zn dla różnych typów regulatorów napięcia

| Lp. | Typ regulatora | Wartość współczynnika ^k r _{zn} |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | BBCK - 1100 a | 0,70 |
| 2 | BBC - AB4/1 | 0,50 |
| 3 | EPA-102 | 1,00 |
| 4 | Magnetyczno-transfuktorowy prod. Siemens-Schuckert | 0,0 |
| 5 | Transfuktorowe prod. Katedry Maszyn Elektrycznych Polit. Śląskiej | 0,0÷0,30 |



Rys. 8. Wykresy zależności $k_{r_{Zn}} / k_{Zn} = F(\cos \varphi_{Zn}^{(k)}) - przy założe$ $niu, że <math>k_{r_{Zn}} = 0,70, S_{q_{Zn}} = -0,05, S_{p_{Zn}} = 0,04, \cos \varphi_{g_{Zn}} = 0,70$ oraz $\rho = 1,0$ (linie ciągłe) i $\rho = 1,1$ (linie przerywane). Większe współczynniki mocy od współczynnika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru



Rys. 9. Wykresy zależności k $/k_{zn} = F(\cos\varphi_{zn}^{(k)}) - przy założe$ $niu, że k = 1,0, S = -0,05, S = 0,04, <math>\cos\varphi_{zn} = 0,70$ oraz $\rho = 1,0$ (linie ciągłe) i $\rho = 1,1$ (linie przerywane). Większe współczymiki mocy od współczymika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru tości ϱ , $S_{q_{ZN}}$, $S_{p_{ZN}}$, $\cos \varphi_{g_{ZN}}$ i $k_{r_{ZN}}$ oraz wykresów zależności $k_{r_{ZN}}/k_{ZN} = F(\cos \varphi_{ZN})$ podanych na rys. 8 i 9 wynika,że wartości współczynników k_{zN} zależą w głównej mierze od wartości współczynników k regulatorów napięcia. Wniosek ten potwierdzają również pomiary współczynników k_{ZN} - przeprowadzone w krajowym systemie elektroenergetycznym. Wartości tych współczynników zestawiono w tablicy 2.

Ze zestawienia w tablicy 2 wynika,że rozrzut wartości współczynników k_{zn} jest dość znaczny. Jest on spowodowany przede wszystkim znacznymi różnicami współczynników k_r (por. tablica 1..

Tablica 2

Zestawienie wartości współczynników względnego nachylenia zależności U = F(f) w węźle pracy równoległej generatorów

| Lp. | Nazwa elektrowni | Typ zainstalowa- nego autom. re- gulatora napięcia | Wartość współ- czynnika k _{zn} = d <u>U</u> • ^f zn U _{zn} | | |
|-----|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 1 | ∃lektrownia Szombierki turbozespół Nr 4 | BBCK - 1100 a | ≌ 0,77 | | |
| 2 | Blektrownia Zabrze turbozespół Nr 6 | BBC - AB4/1 | ≌ 0,60 | | |
| 3 | Blektrownia Blachownia turbozespół Nr 2 | Magnetyczny-trans- duktorowy prod. Siemens-Schuck. | ≌ 0 , 10 | | |
| 4 | Elektrownia Jaworzno turbozespół Nr 2 | JPA - 102 | ≌ 1,24 | | |
| 5 | Elektrownia Halemba turbozespół Nr 1 | Transduktorowy prod. Kat, Maszyn 1. Pol. Sląskiej | ≌ 0 , 45 | | |
| 6 | Elektrownia Poznań turbozespół Nr 1, 2 | BBC - A2/1 | ≌ 0,80 | | |
| 7 | Elektrownia Szczecin turbozespół Nr 6 | BBC – AB2 | ≌ 0,82 | | |

cd. tablicy 2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|
| 8 | Elektrownia Gorzów W.P. turbozespół Nr 1,2,3 | YRVBE | ≌ 0,65 |
| 9 | Elektrownia Otmuchów turbozespół Nr 1,2 | BBC - AB2/1 | ≌ 0,65 |
| 10 | Elektrownia Dychów turbozespół Nr 3 | Korektory elek- tronowe produk- cji radzieckiej | ≌ 1,10 |
| 11 | Wyniki pomiarów prze- prowadzone w systemie EdF [28] | - | 0,65 - 0,75 |

3. ANALIZA WPŁYWU ZMIANY NAPIĘCIA NA SPADEK NAPIĘCIA WYSTĘPUJĄCY W UKŁADZIE PRZESYŁOWYM PRZY STAŁEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Zbadamy wpływ zmiany napięcia – przy stałym poziomie częstotliwości – na spadek napięcia występujący w układzie przesyłowym, którego schemat zastępczy podano na rys. 10.Przez spadek napięcia rozumiemy różnicę algebraiczną napięć na obu krańcach układu.

Dla uproszczenia rozważań – pominięto w pierwszym przybliżeniu przewodności poprzeczne linii i transformatora. W wyniku przyjętych założeń upraszczających schemat zastępczy układu



Eys. 10. Układ przesyłowy (a) i jego uproszczony schemat zastępczy (b) zredukował się do jednej wzdłużnej impedancji zastępczej Z = = R + jX. Posłużymy się obecnie wyrażeniem na pochodną zależności spadku napięcia na impedancji od napięcia na krańcu odbiorczym, a więc $\Im(\Delta U)/\Im U$; wartość tej pochodnej w jednostkach względnych (Λ_U) nazywać będziemy współczynnikiem względnego nachylenia charakterystyki $\Delta U = F(U)$.Współczvnnik względnego nachylenia (Λ_U) jest funkcją stosunku X/R oraz współczynników względnego nachylenia napięciowych charakterystyk statycznych odbioru α_U i β_U [9].

$$\lambda_{U_{n}} = \frac{\alpha_{U_{n}} + \frac{X}{R} \cdot \beta_{U_{n}} \cdot tg\varphi_{n}}{1 + \frac{X}{R} \cdot tg\varphi_{n}} - 1 = \frac{9(\Delta U)}{9U} \cdot \frac{U_{n}}{\Delta U_{n}}$$
(34)

W analogiczny sposób można wyrazić współczynnik względnego nachylenia $(\lambda \begin{pmatrix} k \end{pmatrix})$ po zmianie współczynnika mocy przez kompensację mocy biernej odbioru

$$\lambda_{U_{n}}^{(k)} = \frac{\alpha_{U_{n}} + \frac{X}{R} \beta_{U_{n}}^{(k)} \cdot tg\varphi_{n}^{(k)}}{1 + \frac{X}{R} \cdot tg\varphi_{n}^{(k)}} - 1 = \frac{Q(\Delta U^{(k)})}{QU} \cdot \frac{U_{n}}{\Delta U_{n}^{(k)}}$$
(35)

gdzie:

ΔU^(k) - spadek napięcia po zastosowaniu kompensacji mocy biernej odbioru.

Dyskusję współczynników względnego nachylenia charakterystyk, określonych wzorami (34) i (35), przeprowadzono w opracowaniu [9]. Z przeprowadzonych tam rozważań wynika, że w zakresie małych wartości stosunków X/R (dla X/R < 7,0) zależności $\lambda_{\rm U}$ = F(X/R) oraz $\lambda_{\rm U}$ = F(X/R) wykazują przebieg silnie rosnący.

W miarę wzrostu stosunków X/R - przebiegi $\lambda_{U} = F(X/R)$ oraz $\lambda_{U}^{(k)} = F(X/R)$ stają się coraz bardziej płaskie.Dla du-

żych naturalnych współczynników mocy - różnice we wartościach współczynników $\lambda_{U_{ZN}}$ i $\lambda_{U_{ZN}}^{(k)}$ są nieznaczne, na skutek czego różnice w przebiegach zależności $\Delta U = F(U)$ i $\Delta U^{(k)} =$ = F(U) są również niewielkie. Różnice wartości współczynników $\lambda_{U_{ZN}}$ i $\lambda_{U_{ZN}}^{(k)}$ są tym większe, im mniejsze są naturalne współzn zn zn czynniki mocy. Zależność $\lambda_{U_{ZN}}^{(k)} = F(X/R)$ ma łagodny przebieg przy tym większych wartościach stosunku X/R,im niższy jest naturalny współczynnik mocy i im większy jest stopień kompensacji. Podane na rys. 11 i rys. 12 wykresy zależności $\lambda_{U_{ZN}} =$ = F(X/R) oraz $\lambda_{U_{ZN}}^{(k)} = F(X/R)$ ilustrują przytoczone wyżej wyniki dyskusji.

Ostatecznie dochodzimy do wniosku, że dla wszystkich typów linii (X/R<3) przebieg $\lambda_{U} = F(X/R)$ jest zawsze stromo roszn nący, dla transformatorów natomiast (X/R > 7) przebieg ten jest zawsze płaski. Jeśli więc przesył energii odbywa się na drodze krótkich linii różnych napięć przy kilkakrotnej transformacji, to wypadkowy stosunek X/R >3, a zatem zależności $\lambda_{U} =$ F(X/R) oraz $\lambda_{U}^{(k)} = F(X/R)$ mają - w takim przypadku - przebieg płaski. W przeciwieństwie do tego krzywe zależności $\Delta U =$ $= F(U) i \Delta U^{(k)} = F(U)$ mają przebieg stromo rosnący.

Wykorzystując obecnie prostą zależność między napięciem na krańcu zasilającym i odbiorem

$$U_1 = U_2 + \Delta U(P_2, Q_2)$$
 (36)

- możemy określić wielkość odchylenia napięcia na krańcu odbiorczym δU_{2U} przy zmianie napięcia na początku układu o n

δU1U.

Obliczamy pochodną zależności (36) względem napięcia

$$\frac{dU_1}{dU} = \frac{dU_2}{dU} + \frac{\vartheta(\Delta U)}{\vartheta U_2} \cdot \frac{dU_2}{dU}$$
(37)



Rys. 11. Wykresy zależności $\lambda_{u_{2n}} = F(X/R)$ i $\lambda_{u_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$; krzywa 1 - $\lambda_{u_{2n}} = F(X/R)$ dla $\alpha_{u_{2n}} = 0,55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,85$; krzywa 2 - $\lambda_{u_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,85$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$



Rys. 12. Wykresy zależności $\lambda_{u_{2n}} = F(X/R)$ i $\lambda_{u_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$; krzywa 1 - $\lambda_{u_{2n}} = F(X/R)$ dla $\alpha_{u_{2n}} = 0,55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 - $\lambda_{u_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$
stąd

$$\frac{dU_2}{dU} = \frac{\frac{dU_1}{dU}}{1 + \frac{\partial(\Delta U)}{\partial U_2}}$$
(38)

Po przejściu na jednostki względne i uwzględnieniu, że

$$\delta \mathbf{U}_{2\mathbf{U}} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{U}_2}{\mathrm{d}\mathbf{U}} \cdot \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_2} \qquad \delta \mathbf{U}_{1\mathbf{U}} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{U}_1}{\mathrm{d}\mathbf{U}} \cdot \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_1}$$

oraz po odniesieniu de warunków normalnych otrzymuje się

$$\delta U_{2U_{n}} = \frac{\delta U_{1U_{n}} (1 + \Delta U_{n}^{*})}{1 + \Delta U_{n}^{*} \lambda_{U_{n}}} = \frac{\delta U_{1U_{n}}}{1 + \Delta U_{n}^{*} \lambda_{U_{n}}}$$
(39)

gdzie

$$\Delta \mathbf{U}^* = \frac{\Delta \mathbf{U}_n}{\mathbf{U}_{2_n}}$$

Zmianie napięcia na krańcu odbiorczym towarzyszy jednocześnie zmiana spadku napięcia. Jeśli np. zmniejszamy napięcie na początku układu, to spadek napięcia również maleje ($\lambda_{U_n} > 0$) i obniżenie napięcia na krańcu odbiorczym będzie częściowo kompensowane.

Na rys. 13 przedstawiono zależności $\delta U_{2U_{Zn}} = F(X/R)$ oraz $\delta U_{2U_{Zn}}^{(k)} = F(X/R)$ przy zmianie poziomu napiącia na początku układu o $\delta U_{1U_n} = 1,0 - dla naturalnego współczynnika mocy$ $<math>\cos \varphi_{zn} = 0,70$ (krzywa 1) i po jego poprawie do $\cos \varphi_{zn}^{(k)} = 0,90$ (krzywa 2). Wartości $\delta U_{2U_{Zn}}^{(k)}$ obliczono według wzoru

$$\delta \mathbf{U}_{2\mathbf{U}_{n}}^{(\mathbf{k})} = \frac{\delta \mathbf{U}_{1\mathbf{U}_{n}} \left[1 + (\Delta \mathbf{U}_{n}^{*})^{(\mathbf{k})}\right]}{1 + (\Delta \mathbf{U}_{n}^{*})^{(\mathbf{k})} \cdot \lambda_{u}^{(\mathbf{k})}}$$
(40)

gdzie

 $(\Delta \mathbf{U}_n^*)^{(k)} = \frac{\Delta \mathbf{U}_n^{(k)}}{\mathbf{U}_{2n}}$

"zory (39) i (40) wykorzystane będą w dalszych rozważaniach.



Rys. 13. Tykresy zależności $\delta U_{2u_{Zn}} = F(X/R)$ i $\delta U_{2u_{Zn}}^{(k)} = F(X/R)$ - przy założeniu, że $\delta U_{1u_n} = 1,0$ oraz $\Delta U_{Zn}^* = 0,10$ krzywa 1 - $\delta U_{2u_{Zn}} = F(X/R)$ dla $\alpha_{u_{Zn}} = 0,55, \cos \varphi_{Zn} = 0,70$ Krzywe 2 - $\delta U_{2u_{Zn}}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{Zn} = 0,70$ do $\cos \varphi_{Zn}^{(k)} = 0,90$

4. ANALIZA WPŁYWU ZMIANY CZĘSTOTLIWOŚCI NA SPADEK NAPIĘCIA WYSTĘPUJĄCY W UKŁADZIE PRZESYŁOWYM PRZY STAŁYM NAPIĘCIU NA KRAŃCU ZASILAJĄCYM

Rozważny obecnie wpływ zmiany częstotliwości na spadek napięcia. W tym celu można wykorzystać wzory [9], określające współczynniki względnego nachylenia charakterystyk $\Delta U = F(f)$ i $\Delta U^{(k)} = F(f)$. Wzory te wyrazić można następująco:

$$\lambda_{\underline{f}_{n}} = \frac{\alpha_{\underline{f}_{n}} + \frac{X}{R} t_{\underline{g}} \varphi_{\underline{n}} (\beta_{\underline{f}_{n}} + 1)}{1 + \frac{X}{R} \cdot t_{\underline{g}} \varphi_{\underline{n}}} = \frac{Q(\Delta U)}{Q \underline{f}} \cdot \frac{\underline{f}_{\underline{n}}}{\Delta U_{\underline{n}}}$$
(41)

oraz

$$\lambda_{\underline{f}_{n}}^{(k)} = \frac{\alpha_{\underline{f}_{n}} + \frac{X}{R} t_{\underline{g}} \varphi_{\underline{n}}^{(k)} (\beta_{\underline{f}_{\underline{n}}}^{(k)} + 1)}{1 + \frac{X}{R} \cdot t_{\underline{g}} \varphi_{\underline{n}}^{(k)}} = \frac{\Im(\Delta U^{(k)})}{\Im \underline{f}} \cdot \frac{f_{\underline{n}}}{\Delta U_{\underline{n}}^{(k)}} (42)$$

Przy wyprowadzeniu wzorów (41) i (42) uwzględniono zmianę reaktancji wzdłużnej układu przesyłowego, wywołaną zmianą częstotliwości.

Analiza wzorów (41) i (42) była już zawarta w publikacji [9] Na rys. 14 i 15 przedstawiono wykresy zależności λ_{f} =F(X/R) oraz $\lambda_{f,m}^{(k)}$ = F(X/R). Wykorzystano do ich określenia przeciętne wartości współczynników $\alpha_{f,m}$ i $\beta_{f,m}$ dla typowych zakładów przemysłowych [2, 13, 14]. Warto tu podkreślić, że współczynniki $\lambda_{f,m}$ i $\lambda_{f,m}^{(k)}$ maja na ogół wartości ujemne, czyli zmniejszenie częstotliwości powoduje wzrost spadku napięcia i tym samym zmniejszenie napięcia na krańcu odbiorczym. Jedynie dla naturalnego współczynnika mocy cos φ_{zn} = 0,85 oraz stosunków X/R < 1,4 - wartości współczynników $\lambda_{f,m}$ są dodatnie (p. rys. 14). Zmienność przebiegu funkcji $\lambda_{f,m}$ = F(X/R) i



Rys. 14. Wykresy zależności $\lambda_{f_{2n}} = F(X/R)$ i $\lambda_{f_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$; krzywa 1 - $\lambda_{f_{2n}} = F(X/R)$ dla $\alpha_{f_{2n}} = 1,10$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{2n} = 0,85$; krzywa 2 - $\lambda_{f_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$, po poprawie $\cos\varphi_{2n} = 0,85$ do $\cos\varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$



Rys. 15. Wykresy zależności $\lambda = F(X/R)$ i $\lambda^{(k)} = F(X/R)$; krzywa 1 – $\lambda = F(X/R)$ dla $\alpha = 1,10$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 – $\lambda^{(k)}_{2n} = F(X/R)$, po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi^{(k)}_{2n} = 0,90$

(k) = F(X/R) zależy od stosunku X/R - podobnie jak w poprzednio rozpatrywanych funkcjach $\lambda_U = F(X/R)$ i $\lambda_U^{(k)} = F(X/R)$. Przy wyprowadzaniu wzorów (41) i (42) poczyniono zasadnicze założenie upraszczejące. Można obecnie te wzory uściślić, uwzględniając zmiany poboru mocy czynnej i biernej wywołanej odchyleniem napięcia na krańcu odbiorczym. Oznacza to, że wpływ zmiany częstotliwości na spadek napięcia uwzględniamy z jednej strony przez bezpośredni wpływ częstotliwości na pobór mocy, a z drugiej strony przez wpływ pośredni, wynikający z uwzględnienia napięciowej zależności poboru mocy pod wpływem zmiany częstotliwości. Ogólnie mamy więc zależność $\Delta U = F(f,U)$.

Stąd

$$\frac{d(\Delta U)}{dI} = \frac{\partial(\Delta U)}{\partial I} + \frac{\partial(\Delta U)}{\partial U} \cdot \frac{dU}{dI}$$
(43)

Uwzględniając podane uprzednio zależności (34) i (41) można zależność (43) zapisać w postaci

$$\lambda_{f,U_n} = \lambda_{f_n} + \lambda_{U_n} \cdot \xi_n \tag{44}$$

gdzie:

ξ_n = dU df · U^f_n - współczynnik określający względną zmianę napięcia na krańcu Odbiorczym, wywołaną zmianą częstotliwości.

W poprzednich rozważaniach wykazano, że wartości współczynników λ_{1} i $\lambda_{1}^{(k)}$ są na ogół ujemne. Jeśli założymy, że na zn zn zn zn początku układu dU/df = 0, to dla $\lambda_{1} < 0$ względnie $\lambda_{1}^{(k)} < 0$ mamy $\xi_{n} > 0$, Stąd iloczyny $\lambda_{U_{n}} \cdot \xi_{n}$ i $\lambda_{U_{u}}^{(k)} \cdot \xi_{n}$ są dodatnie, gdyż $\lambda_{U_{n}} > 0$ i $\lambda_{U_{n}}^{(k)} > 0$. Bezwzględne wartości współczynników spełniają nierówność

$$|\lambda_{f,U_n}| < |\lambda_{f_n}| |\lambda_{f,U_n}^{(k)}| < |\lambda_{f_n}^{(k)}|$$
(45)

Oznacza to, że wpływ częstotliwości na zmianę napięcia na krańcu odbiorczym jest częściowo kompensowany przez zmianę pobieranej mocy czynnej i biernej odpowiednio do napięciowych charakterystyk statycznych odbioru.

Wykorzystując równanie (43) można zależność (44) zapisać w postaci

$$\lambda_{\mathbf{f},\mathbf{U}_{n}} = \lambda_{\mathbf{f}_{n}} + \lambda_{\mathbf{U}_{n}} \left(-\Delta \mathbf{U}_{n}^{*} \cdot \lambda_{\mathbf{f},\mathbf{U}_{n}}\right)$$
(46)

oraz

$$\lambda_{f,U_n}^{(k)} = \lambda_{f_n}^{(k)} + \lambda_{U_n}^{(k)} \left[-(\Delta U_n^*)^{(k)} \cdot \lambda_{f,U_n}^{(k)} \right]$$
(47)

stąd

$$\lambda_{f,U_n} = \frac{\lambda_{f_n}}{1 + \Delta U_n^* \cdot \lambda_{U_n}}$$
(48)

oraz

$$\lambda_{\mathbf{f},\mathbf{U}_{n}}^{(k)} = \frac{\lambda_{\mathbf{f}_{n}}^{(k)}}{1 + (\Delta \mathbf{U}_{n}^{*})^{(k)} \cdot \lambda_{\mathbf{U}_{n}}^{(k)}}$$
(49)

gdzie

$$\Delta u_n^* = \frac{\Delta u_n}{u_{2_n}}; \quad (\Delta u_n^*)^{(k)} = \frac{\Delta u_n^{(k)}}{u_{2_n}}$$

Na rys. 16 podano wykresy zależności $\lambda_{f,U_{ZN}} = F(X/R)$ oraz $\lambda_{f,U_{ZN}}^{(k)} = F(X/R)$. Przyjęto tu, że przed kompensacją mocy biernej odbioru $\Delta U_{ZN}^* = 0,10$.



Rys. 16. Wykresy zależności $\lambda_{f,u_{Zn}} = F(X/R)$ i $\lambda_{f,u_{Zn}}^{(k)} = F(X/R)$ przy założeniu, że przed kompensacją mocy biernej odbioru $\Delta U_{Zn}^{*} = 0,10$ krzywa 1 – $\lambda_{f,u_{Zn}} = F(X/R)$ dla $\alpha_{f_{Zn}} = 1,10 \alpha_{u_{n}} = 0,55$ oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{Zn} = 0,70$ krzywa 2 – $\lambda_{f,u_{Zn}}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{Zn} = 0,70$ do $\cos \varphi_{Zn}^{(k)} = 0,90$

5. WPŁYW ZMIANY CZĘSTOTLIWOŚCI NA ODCHYLENIA NAPIĘCIA WYSTĘPUJĄCE NA KRAŃCU ODBIORCZYM UKŁADU PRZESYŁOWEGO

Wykorzystując podane w rozdz.4 wzory, można określić procentowe odchylenie napięcia na krańcu odbiorczym - przy zmianie częstotliwości o 1%. W tym celu można posłużyć się wzorem

$$\delta U_{2f,U_n} = -\Delta U_n^* \cdot \lambda_{f,U_n}$$
(50)

oraz

$$\delta U_{2f,U_n}^{(k)} = -(\Delta U_n^*)^{(k)} \cdot \lambda_{f,U_n}^{(k)}$$
(51)



Rys. 17. Tykresy zależności $\delta U_{2f,u_{ZR}} = F(X/R) i \delta U_{2f,u_{ZR}}^{(k)}$ = F(X/R) - przy założeniu, że przed kompen nej odbioru $\Delta U_{zn}^* = 0,10$ że przed kompensacja mocy bier-= 1,10, œ_u_{zn} $\delta U_{2f,u_{zn}} = F(X/R) dla \alpha_{f_{zn}}$ 0,55 krzywe 1 oraz naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{\rm ZN} = 0,70$ SU(k) = F(X/R), po poprawie $\cos\varphi$ krzywa 2 0,70 do 21,uzn $\cos\varphi_{\rm ZN}^{\rm (k)}=0,90$

Na rys. 17 podano wykresy zależności $\delta U_{2f,U_{2n}} = F(X/R)$ oraz $\delta U_{2f,U_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$. Z wykresów tych wynika, że dla współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ i po jego poprawie do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$ zmiana napięcia na krańcu odbiorczym, przy zmianie częstotliwości o 1,0% - nie jest większa od ok. 0,22%.

W przeprowadzonych dotąd rozważaniach zakładano, że zmiana częstotliwości nie wywołuje zmiany poziomu napięcia na początku układu. Jeśli jednak zmiana taka zachodzi,to wtedy mamy jak gdyby dwa nakładające się związki i całkowite odchylenie napięcia na krańcu odbiorczym

$$\delta U_{2_n} = \delta U_{21,U_n} + \delta U_{2U_n}$$
(52)

Ze wzoru (52) wynika, że na całkowite odchylenie napiącia na krańcu odbiorczym składa się; odchylenie napiącia spowodowane zmianą spadku napiącia pod wpływem zmiany częstotliwości $(\delta U_{2f}, U_n)$ oraz odchylenie napiącia (δU_{2U_n}) wywołane skutkiem zmiany napiącia na początku układu, pod wpływem zmiany częstotliwości.

Wykorzystując obecnie zależności (39), (40) oraz (50) i (51) możemy wzór (52) przedstawić w postaci

$$\delta U_{2n} = -\Delta U_n^* \lambda_{\underline{L}, U_n} + \frac{\delta U_{1U_n}}{1 + \Delta U_n^* \cdot \lambda_{\underline{U}_{2n}}}$$
(53)

lud

$$\delta \mathbf{U}_{2_{n}} = \frac{-\Delta \mathbf{U}_{n}^{*} \cdot \lambda_{1_{n}}}{1 + \Delta \mathbf{U}_{n}^{*} \lambda_{U_{n}}} + \frac{\delta \mathbf{U}_{1\mathbf{U}_{n}}(1 + \Delta \mathbf{U}_{n}^{*})}{1 + \Delta \mathbf{U}_{n}^{*} \cdot \lambda_{U_{n}}}$$
(54)

stąd ostatecznie, przyjmując k_n = ⁸U_{1U_n}

$$\delta U_{2_{n}} = \frac{k_{n}(1 + \Delta U_{n}^{*}) - \Delta U_{n}^{*} \cdot \lambda_{1_{n}}}{1 + \Delta U_{n}^{*} \cdot \lambda_{U_{n}}}$$
(55)

oraz

$$\delta U_{2_{n}}^{(k)} = \frac{k_{n} \left[1 + (\Delta U_{n}^{*})^{(k)}\right] - (\Delta U_{n}^{*})^{(k)} \cdot \lambda_{\underline{r}_{n}}^{(k)}}{1 + (\Delta U_{n}^{*})^{(k)} \cdot \lambda_{U_{n}}^{(k)}}$$
(56)

Do tych samych wyników dochodzi się, wykorzystując uwikłany związek analityczny między napięciem na krańcu zasilającym i odbiorczym

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_{\mathbf{1}} - \Delta \mathbf{U}(\mathbf{Q}, \mathbf{P}) \tag{57}$$

oraz charakterystykami odbioru Q (f,U), P(f, U) – co potwierdza słuszność wyżej przedstawionej interpretacji złożoności wpływu charakterystyk odbioru i charakterystyk regulatora na zmienność napięcia w węźle odbiorczym.

Obliczmy różniczkę zupełną

$$dU = dU_1 - \left(\frac{\vartheta(\Delta U)}{\vartheta U} \cdot dU + \frac{\vartheta(\Delta U)}{\vartheta f} \cdot df\right)$$
(58)

- uwzględniając, że napięcia U₁ i U₂ są ostatecznie funkcjami zmian częstotliwości otrzymuje się

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}T} = \frac{\frac{\mathrm{d}U_1}{\mathrm{d}T} - \frac{\partial(\Delta U)}{\partial T}}{1 + \frac{\partial(\Delta U)}{\partial U}}$$
(59)

Po przejściu na jednostki względne i po odniesieniu do rzeczywistych parametrów energii elektrycznej (f_n, U_n) w normalnych warunkach pracy odbioru

$$\delta U_{2f,U_n} = \frac{k_n (1 + \Delta U_n^*) - \Delta U_n^* \cdot \lambda_{f_n}}{1 + \Delta U_n^* \cdot \lambda_{U_n}}$$
(60)

Zmienność napięcia w funkcji częstotliwości w węźle pracy równoległej wyznaczono w rozdz. 2 (wzór 26). Należy mieć na uwadze, że wyznaczona w tym rozdziale zmienność napięcia odnosi się do przypadku odbiorów przyłączonych bezpośrednio do węzła pracy równoległej.

Układ przesyłowy zmienia nachylenia charakterystyk mocy czynnej i biernej – w funkcji napięcia i częstotliwości – odbieranej z węzła pracy równoległej; $0P_1/0f$, $0P_1/0U_1$, $0Q_1/0f$, $0Q_1/0U_1$,

w porównaniu do charakterystyk odbioru na krańcu odbiorczym na skutek strat mocy czynnej i biernej w układzie przesyłowym. konsekwencji do obliczeń współczynnik k należy w równanie (26) wstawić współczynniki

$$\alpha_{1U_n}, \alpha_{1f_n}, \beta_{1f_n}, \beta_{1U_n}$$

- które zależą od parametrów układu przesyłowego i współczynników

$$\alpha_{U_n}, \alpha_{f_n}, \beta_{f_n}, \beta_{U_n}$$

Uwzględniając, że

$$P_{1} = P(U,f) + \Delta P(U, f)$$

$$O_{1} = O(U,f) + \Delta O(U, f)$$
(61)

otrzymuje się różniczki zupełne mocy na obu krańcach układu przesyłowego

$$d\mathbb{P}_{1} = \left(\frac{\partial \mathbb{P}}{\partial U} + \frac{\partial (\Delta \mathbb{P})}{\partial U}\right) dU + \left(\frac{\partial \mathbb{P}}{\partial \mathbb{P}} + \frac{\partial (\Delta \mathbb{P})}{\partial \mathbb{T}}\right) d\mathbf{1}$$
(62)

$$d\Omega_1 = \left(\frac{\partial}{\partial U} + \frac{\partial}{\partial U}\right) dU + \left(\frac{\partial}{\partial f} + \frac{\partial}{\partial L}\right) df$$

Z równania (58, wynikają relacje różniczek zupełnych napięcia na obu krańcach układu przesyłowego

$$dU = \frac{dU_1 - \frac{Q(\Delta U)}{QT} \cdot dx}{1 + \frac{Q(\Delta U)}{QU}}$$
(63)

Wyrazimy w równaniach (62) różniczkę zupełną dU za pomocą równania (63)

$$dP_{1} = \frac{\partial P}{\partial U} + \frac{\partial (\Delta P)}{\partial U} (dU_{1} - \frac{\partial (\Delta U)}{\partial f} df) + (\frac{\partial P}{\partial f} + \frac{\partial (\Delta P)}{\partial f}) df$$
(64)

$$d_{1} = \frac{\frac{\partial}{\partial U} + \frac{\partial(\Delta U)}{\partial U}}{1 + \frac{\partial(\Delta U)}{\partial U}} (dU_{1} - \frac{\partial(\Delta U)}{\partial f} df) + (\frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial f}) df$$
(65)

Jeśli uwzględnimy, że moce P₁ i Q₁ są funkcjami napięcia U₁ na krańcu zasilającym i częstotliwości

$$dP_1 = \frac{\partial P_1}{\partial U_1} \cdot dU_1 + \frac{\partial P_1}{\partial f} df$$
 (66)

$$d\Omega_1 = \frac{\partial \Omega_1}{\partial U_1} \cdot dU_1 + \frac{\partial \Omega_1}{\partial f} df$$
(67)

to z porównania (66), (67) z (64), 65) wynika

$$\frac{\partial P_1}{\partial U_1} = \frac{\frac{\partial P}{\partial U} + \frac{\partial (\Delta P)}{\partial U}}{1 + \frac{\partial (\Delta U)}{\partial U}}$$
(68a)

$$\frac{\partial P_{4}}{\partial f} = \frac{\partial P}{\partial f} + \frac{\partial (\Delta P)}{\partial f} - \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial U} + \frac{\partial (\Delta P)}{\partial U}\right) - \frac{\partial (\Delta U)}{\partial I}}{1 + \frac{\partial (\Delta U)}{\partial U}}$$
(68b)

analogicznie

$$\frac{\partial Q_1}{\partial U_1} = \frac{\frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{\partial (\Delta Q)}{\partial U}}{1 + \frac{\partial (\Delta U)}{\partial U}}$$
(69a)

$$\frac{\partial Q_1}{\partial T} = \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial (\Delta Q)}{\partial f} - \frac{\left(\frac{\partial Q}{\partial U} + \frac{\partial (\Delta Q)}{\partial T}\right)}{1 + \frac{\partial (\Delta U)}{\partial U}}$$
(69b)

Po wprowadzeniu jednostek względnych

$$\alpha_{1U_{n}} = \frac{(1 + \Delta U_{n}^{*}) (\alpha_{U_{n}} + \Delta \alpha_{U_{n}} \cdot \Delta P_{n}^{*})}{(1 + \Delta P_{n}^{*}) (1 + \Delta U_{n}^{*} \cdot \lambda_{U_{n}})}$$
(70a)

TI .

gdzie:

$$\Delta P_n^* = \frac{\Delta P_n}{P_{2_n}}; \quad \Delta U_n^* = \frac{\Delta U_n}{U_{2_n}}; \quad \Delta \alpha_{U_n} = \frac{\mathcal{Q}(\Delta P)}{\mathcal{Q}U} \cdot \frac{\mathcal{Q}_n}{\Delta P_n}$$

 $\Delta \alpha_{U_n}$ - współczynnik względnego nachylenia zależności $\Delta P = F(U)$ - por. rozdz. 6

$$\alpha_{1f_{n}} = \frac{\alpha_{f_{n}} + \Delta P^{*} \Delta \alpha_{f_{n}}}{1 + \Delta P^{*}_{n}} - \frac{\alpha_{U_{n}} + \Delta \alpha_{U_{n}} \cdot \Delta P_{n}}{1 + \Delta P^{*}_{n}} \cdot \frac{\lambda_{f_{n}} \Delta U_{n}}{1 + \Delta U_{n} \cdot \lambda_{U_{n}}}$$
(70b)

gdzie:

 $\Delta \alpha_{f_n} = \frac{\theta(\Delta P)}{\theta I} \cdot \frac{f_n}{\Delta P_n} - współczynnik względnego nachylenia za$ $leżności \Delta P = F(f) - por. rozdz. 6.$

$$3_{1U_{n}} = \frac{(1 + \Delta U_{n}^{*}) (\beta_{U_{n}} + \Delta \beta_{U_{n}} \cdot \Delta Q_{n}^{*})}{(1 + \Delta Q_{n}^{*}) (1 + \Delta U_{n}^{*} \cdot \lambda_{U_{n}})}$$
(71a)

gdzie

$$\Delta_{n}^{*} = \frac{\Delta_{n}}{2_{n}}; \quad \Delta \beta_{U_{n}} = \frac{\vartheta(\Delta)}{\vartheta U} \cdot \frac{\vartheta_{2_{n}}}{\Delta_{n}}$$

 $\Delta \beta_{U_n}$ - współczynnik wzglądnego nachylenie zależności ΔQ = = F(U) - por. rozdz. 6

$$\beta_{1_{n}} = \frac{\beta_{1_{n}} + \Delta Q_{n}^{*} \cdot \Delta \beta_{1_{n}}}{1 + \Delta Q_{n}^{*}} - \frac{\beta_{U_{n}} + \Delta \beta_{1_{n}} \cdot \Delta Q_{n}^{*}}{1 + \Delta Q_{n}^{*}} \cdot \frac{\lambda_{1_{n}} \cdot \Delta U_{n}^{*}}{1 + \Delta U_{n}^{*} \cdot \lambda_{U_{n}}}$$
(71b)

gdzie

$$\Delta \beta_{f_n} = \frac{\partial (\Delta Q)}{\partial f} \cdot \frac{f_n}{\Delta Q_n} - \text{współczynnik względnego nachylenia za-leżności $\Delta Q = F(f) - \text{por. rozdz. 6.}$$$

Dla zilustrowania wpływu spadku napięcia, stopnia kompensacji mocy biernej odbioru, stosunku (X/R) i stratmocy na kształtowanie się wartości współczynników względnego nachylenia charakterystyk na krańcu zasilającym układu przesyłowego – podano na rys. 21, 22, 23 i 24 wykresy zależności: $\alpha_{1U_n} = F(X/R)$, $\alpha_{1U_n}^{(k)} = F(X/R)$, $\beta_{1U_n} = F(X/R)$, $\beta_{1U_n}^{(k)} = F(X/R)$

$$\alpha_{1f_n} = F(X/R), \ \alpha_{1f_n}^{(k)} = F(X/R), \ \beta_{1f_n} = F(X/R), \ \beta_{1f_n} = F(X/R),$$

Przy ich wyznaczaniu wykorzystano wykresy zależności; $\Delta P^* = F(X/R), (\Delta P^*)^{(k)} = F(X/R) - [rys. 19], \Delta P^* = F(X/R), (\Delta Q^*)^{(k)} = F(X/R) - [rys. 20] oraz (\Delta U^*)^{(k)} = F(X/R) - [rys. 18], okre$ ślone według wzorów

$$\Delta P^* = \Delta U^* \frac{1 + tg \varphi}{1 + \frac{1}{R} tg \varphi}$$
(722)

$$\Delta Q^* = \Delta P^* \cdot \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{t_E \varphi}$$
(72b)

$$(\Delta U^*)^{(k)} = \Delta U^* \frac{1 + \frac{X}{R} \operatorname{tg} \varphi^{(k)}}{1 + \frac{X}{R} \operatorname{tg} \varphi}$$
(72c)

$$(\Delta \mathbf{P}^*)^{(\mathbf{k})} = (\Delta \mathbf{U}^*)^{(\mathbf{k})} \cdot \frac{1 + tg^2 \varphi^{(\mathbf{k})}}{1 + \frac{X}{R} tg \varphi^{(\mathbf{k})}}$$
(72d)

$$(\Delta Q^*)^{(k)} = (\Delta P^*)^{(k)} \cdot \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{tg\varphi^{(k)}}$$
(72e)

- oraz założeniu, że przed kompensacją mocy biernej odbioru $(\cos \varphi_{zn} = 0,70)$ względny spadek napięcia $\Delta U_{zn} = 0,10$.

Przy małych względnych stratach mocy czynnej w układzie przesyłowym, współczynniki względnego nachylenia charaktery-



Rys. 18. Wykres zależności $(\Delta U_{zn}^{*}(k)) = F(X/R) - po poprawie na$ $turalnego współczynnika mocy <math>\cos \varphi_{zn} = 0,70$ do $\cos \varphi_{zn}^{(k)} = 0,90$ oraz przy założeniu, że przed zastosowaniem kompensacji mocy biernej odbioru $\Delta U_{zn}^{*} = 0,10$







Rys. 20. Wykresy zależności $\Delta Q_{2n}^* = F(X/R)$ i $(\Delta Q_{2n}^*)^{(k)} = F(X/R)$ - przy założeniu, że przed kompensacją mocy biernej odbioru $\Delta U_{2n}^* = 0,10$ krzywa 1 - $\Delta Q_{2n}^* = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ krzywa 2 - $(\Delta Q_{2n}^*)^{(k)} = F(X/R)$, po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$

styk mocy czynnej na krańcu zasilającym niewiele się różnią od odpowiednich współczynników na krańcu odbiorczym. Stąd

$$\alpha_{1U_{n}} \approx \alpha_{U_{n}} \qquad \alpha_{1U_{n}}^{(k)} \approx \alpha_{U_{n}}^{(k)}$$

$$\alpha_{1f_{n}} \approx \alpha_{f_{n}} \qquad \alpha_{1f_{n}}^{(k)} \approx \alpha_{f_{n}}^{(k)}$$
(73)

W przypadku charakterystyk mocy biernej, różnice w wartościach współczynników odpowiednich charakterystyk na obu krańcach układu przesyłowego są tym większe, im większe są względne straty mocy biernej. Spełniona jest tu nierówność:



Rys. 21. Wykresy zależności $\alpha_{1u_n} = F(X/R)$ i $\alpha_{1u_n}^{(k)} = F(X/R)$ - przy założeniu, że $\alpha_{u_{2n}} = 0,55$, $\Delta \alpha_{u_{2n}} = 1,48$ $\Delta \alpha_{u_{2n}}^{(k)} = 0,40$, $\Delta U_{2n}^* = 0,10$; krzywa 1 - $\alpha_{1u_n} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 - $\alpha_{1u_n}^{(k)} = F(X/R)$, po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$



Rys. 22. Wykresy zależności $\beta_{1u_n} = F(X/R)$ i $\beta_{1u_n}^{(k)} = F(X/R)$ - przy założeniu, że $\beta_{u_{2n}} = 2,84$, $\beta_{u_{2n}}^{(k)} = 3,77 \quad \Delta \beta_{u_{2n}}^{(k)} = 0,40$, $\Delta \beta_{u_{2n}} = 1,48$, $\Delta U_{2n}^* = 0,10$; krzywa 1 - $\beta_{1u_n} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 - $\beta_{1u_n}^{(k)} =$ = F(X/R), po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$

$$\beta_{1U_{n}} < \beta_{U_{n}}; \qquad \beta_{1U_{n}} < \beta_{U_{n}}^{(k)}$$

$$|\beta_{1f_{n}}| < |\beta_{f_{n}}^{(k)}|; \qquad |\beta_{1f_{n}}^{(k)}| < |\beta_{f_{n}}^{(k)}|$$

$$(74)$$

Wykorzystując obecnie wzory (55) i (56) można określić procentową wielkość odchylenia napięcia na krańcu odbiorczym - w stosunku do poziomu znamionowego - przy zmianie częstotliwości w systemie o 1,0%. Na rys. 29 podano wykresy zależności $\delta U_2 =$ = F(X/R) i $\delta U_2^{(k)} = F(X/R)$ przy zmianie częstotliwości o 1,0%



Rys. 23. Wykresy zależności $\alpha_{1f_n} = F(X/R)$ i $\alpha_{1f_n}^{(k)} = F(X/R) - przy założeniu, że <math>\alpha_{f_{2n}} = 1,10, \Delta \alpha_{f_{2n}} = -1,82, \alpha_{u_{2n}} = 0,55, \Delta \alpha_{u_{2n}} = 1,48, \Delta \alpha_{u_{2n}}^{(k)} = 0,40, \Delta \alpha_{f_{2n}}^{(k)} = -0,90, \Delta U_{2n}^* = 0,10$ krzywa 1 - $\alpha_{1f_n} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ krzywa 2 - $\alpha_{1f_n}^{(k)} = F(X/R)$, po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = -0,90$



Rys. 24. Wykresy zależności $\beta_{1f_n} = F(X/R)$ i $\beta_{1f_n}^{(k)} = F(X/R) - przy założeniu, że <math>\beta_{f_{2n}} = -2,84$, $\beta_{f_{2n}}^{(k)} = -7,10$, $\Delta\beta_{f_{2n}} = -0,82$, $\Delta\beta_{f_{2n}}^{(k)} = -5,2$, $\beta_{u_{2n}} = 2,84$, $\beta_{u_{2n}}^{(k)} = 3,77$, $\Delta\beta_{u_{2n}} = 1,48$, $\Delta\beta_{u_{2n}}^{(k)} = 0,40$ $\Delta U_{2n}^* = 0,10$; krzywa $1 - \beta_{1f_n} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos\varphi_{2n} = 0,70$; krzywa $2 - \beta_{1f_n}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos\varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos\varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$



Rys. 25. Wykresy z:leżności $k_{1n} = F(X/R)$ i $k_{1n}^{(k)} = F(X/R)$ przy założeniu, że $k_{r_{zn}} = 0,0$; krzywa 1 - $k_{1n} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{zn} = 0,70$; krzywa 2 - $k_{1n}^{(k)} =$ = F(X/R) po poprawie $\cos \varphi_{zn} = 0,70$ do $\cos \varphi_{zn}^{(k)} = 0,90$



Rys. 26. Wykresy zależności $k_{1n} = F(X/R)$ i $k_{1n}^{(k)} = F(X/R) - przy założeniu, że <math>k_{1n} = 1,0$; krzywa 1 - $k_{1n} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{zn} = 0,70$; krzywa 2 - $k_{1n}^{(k)} = F(X/R)$, po poprawie $\cos \varphi_{zn} = 0,70$ do $\cos \varphi_{zn}^{(k)} = 0,90$



Rys. 27. Wykresy zależności k $/k_{n} = F(X/R)$ i $k_{r_{n}}/k_{1_{n}}^{(k)} = F(X/R) - przy założeniu k_{r_{n}} = 1,0$ krzywa 1 $k_{r_{n}}/k_{1_{n}} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy

 $cos \varphi_{zn} = 0,70$ krzywa 2 k /k (k) = F(X/R), po poprawie cos $\varphi_{zn} = 0,70$ do $cos \varphi_{zn}^{(k)} = 0,90$

oraz przy występującej jednocześnie zmianie napięcia w węźle pracy równolegiej generatorów według zależności podanych na rysunku 26. Do ekreślenia tych ostatnich zależności wykorzystano wzór (30) oraz wykresy podane na rys. 21, 22, 23 i 24.

W przytoczonych dotąd rozważaniach mie uwzględniono parametrów poprzecznych, a więc mecy biernej generowanej przez pojemność linii przesyłowych wyższych napięć oraz strat mocy biernej, występujących w reaktancjach poprzecznych transformatorów.

Obniżenie częstotliwości w systemie powoduje zmniejszenie mocy biernej generowanej przez pojemność linii przesyłowych oraz wzrost mocy biernej magnesowania w transformatorach - co z kolei wywołuje zmniejszenie napięcia w węzłach systemu. To obniżenie napięcia wywołuje wprawdzie dalsze zmniejszenie mocy



Rys. 28. Wykresy zależności $\delta U_{2u_{2n}} = F(X/R) i \delta U_{2u_{2n}}^{(k)} = F(X/R)$ przy zmianie napięcia na krańcu zasilającym wg zależności k = P(X/R) - p. rys. 26; krzywa 1 - $\delta U_{2u_{2n}} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 - $\delta U_{2u_{n}}^{(k)} = F(X/R)$, po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$



Rys. 29. Wykresy zależności $\delta U_{2n} = F(X/R) i \delta U_{2n}^{(k)} = F(X/R)$ przy zmianie częstotliwości w systemie o 1,0% i przy zmianie napięcia na krańcu zasilającym wg zależności k = F(X/R) p. rys. 26; krzywa 1 - δU_{2} = F(X/R) dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 - $\delta U_{2n}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n}^{(k)} = 0,90$



Rys. 30. Wykresy zaleźności $\delta U_{2} = F(X/R) i \delta U_{2n}^{(k)} = F(X/R)$ przy zmianie częstotliwości w systemie o 1,0% i przy założeniu że $k_{r_{2n}} = 0,70$; krzywa 1 - $\delta U_{2} = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,70$; krzywa 2 - $\delta U_{2}^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{2n} = 0,70$ do $\cos \varphi_{2n} = 0,90$ biernej generowanej przez pojemność linii, ale równocześnie powoduje także zmniejszenie mocy biernej magnesowania transformatorów oraz mocy pobiernej przez odbiory - co znowu w pewnym stopniu kompensuje wpływ zmiany częstotliwości na zmianę poziomów napięcia.

Dla zilustrowania ilościowego wpływu reaktancji poprzecznych na wartość δU_{2U_n} , $\delta U_{2f,U_n}$ i δU_{2n} , podano w omawianej już publikacji [9] odpowiednią analizę liczbową. Rozpatrzono tam dwa różne układy przesyłowe, z których jeden zasila odbiór o naturalnym współczynniku mocy $\cos \varphi_{2n} = 0,80$, a drugi odbiór o cos $z_n = 0,70$. Z przeprowadzonych obliczeń wynikało, że we wszystkich ośmiu rozpatrywanych przypadkach pominięcie reaktan-



Rys. 31. Wykresy zależności $\delta U_{2f,u_{Zn}}/\delta U_{2} = F(X/R) = \delta$ i $\delta U_{2f,u_{Zn}}^{(k)}/\delta U_{2}^{(k)} = F(X/R) = \delta^{(k)} - dla k_{r} = 1,0$ krzywa 1 - $\delta = F(X/R)$ dla naturalnego współczynnika mocy $\cos \varphi_{Zn} = 0,70$ krzywa 2 - $\delta^{(k)} = F(X/R)$ po poprawie $\cos \varphi_{Zn} = 0,70$ do $\cos \varphi_{Zn}^{(k)} = 0,90$





cji poprzecznych nie powoduje 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 $(Q_{\mu} - Q_{o})$ jest zwykle mała w stosunku do mocy biernej przesyłanej przez linię. Jeśli natomiast moc bierna odbioru jest całkowicie lub w wysokim stopniu skompensowana $\cos q_{zn}^{(k)} \approx 1.0$, to przesył odbywa się przy bardzo dużym współczynniku mocy. Wtedy we wzorach (35) i (42) człony zawierające tg $q_{n}^{(k)}$ są bardzo małe i wpływ ich na końcowy wynik obliczeń $\lambda_{r}^{(k)}$ jest pomijalny, a uwzględnienie czy też nieuwgzlędnienie reaktancji poprzecznych odbija się właśnie na wartościach tych członów. Ostatecznie z analizy tej wysnuto wniosek, że nie uwzględnienie reaktancji poprzecznych nie ma istotnego wpływu na całokształt przeprowadzonych rozważań.

Zastanówmy się obecnie nad udziałem $\delta U_{2f,U_n}$ w całkowitym odchyleniu napięcia δU_2 , wywołanym zmianą częstotliwości. Z wykresów podanych na rys. 31, 32 wynika, że udział ten wzrasta ze wzrostem stosunku X/R oraz ze wzrostem stopnia kompensacji mocy biernej. Na wzrost tego udziału ma ponadto wpływ wielkość względnego spadku napięcia, występującego w układzie przesyłowym oraz współczynnik względnego nachylenia charakterystyki U = F(f) w węźle pracy równoległej generatorów.

Z przeprowadzonych wyżej rozważań wynika, że wpływ zmiany częstotliwości na zmianę poziomów napięć w węzłach sieciowych jest nieznaczny, o ile poziomy napięć w węzłach pracy równoległej generatorów nie ulegają zmianie (p. rys. 17).

Prawdziwość podanego wyżej wniosku potwierdziły pomiary poziomów napięć w węzłach sieciowych - przy zmianach częstotliwości w wydzielonych z systemu układach. Stwierdzono, że jeśli zmianie częstotliwości w układzie nie towarzyszyły zmiany napięcia w węzłach pracy równoległej generatorów, to w węzłach sieciowych występowały tylko nieznaczne zmiany napięcia. Jeśli natomiast jednocześnie ze zmianą częstotliwości występowały zmiany napiecia w wezłach pracy równoległej generatorów, to według prawie analogicznej zależności zmieniały się napięcia w węzłach sieciowych. Pomiary takie powtarzano wielokrotnie dla szeregu wydzielonych z systemu układów, otrzymując każdorazowo zgodność podanych wyżej relacji. Na rys. 33 pokazano schemat układu ZEOZ, na którym podano - w charakterystycznych punktach - uzyskane z pomiarów wartości odchyleń napięcia SU, jakie występowały przy zmianie częstotliwości o 1,05 w stosunku do poziomu znamionowego (50 Hz).



Rys. 33. Schemat układu ZEOZ - wydzielonego z systemu krajowego na okres trwania pomiarów. W charakterystycznych węzlach układu naniesiono otrzymane z pomiarów wartości ôU22

6. WPŁYW ZMIANY CZĘSTOTLIWOŚCI NA STRATY WZDŁUŻNE WYSTĘPUJĄCE W UKŁADACH SIECIOWYCH

Zmiana napięcia na krańcu odbiorczym wywołuje zmianę strat wzdłużnych mocy czynnej i biernej w układzie przesyłowym według charakterystyk $\Delta P = F(U)$ i $\Delta Q = F(U)$. Współczynniki względnego nachylenia tych charakterystyk określa się wzorami [8]

$$\Delta \alpha_{U_n} = 2 \left(\frac{\alpha_{U_n} + \beta_{U_n} \cdot tg \tilde{\varphi}_n}{1 + tg \tilde{\varphi}_n} - 1 \right) = \frac{\varrho(\Delta P)}{\varrho U} \cdot \frac{U_n}{\Delta P_n}$$
(75a)

$$\Delta \beta_{U_n} = 2 \left(\frac{\alpha_{U_n} + \beta_{U_n} tg_{\eta_n}^2}{1 + tg_{\eta_n}^2} - 1 \right) = \frac{\Im(\Delta Q)}{\Im U} \cdot \frac{U_n}{\Delta Q_n}$$
(75b)

- a po kompensacji mocy biernej odbioru

$$\Delta \alpha_{U_n}^{(\mathbf{k})} = 2 \left(\frac{\alpha_{U_n} + \beta_{U_n}^{(\mathbf{k})} \cdot \mathrm{tg}^2 \varphi_n^{(\mathbf{k})}}{1 + \mathrm{tg}^2 \varphi_n^{(\mathbf{k})} - 1} - 1 \right) = \frac{\mathcal{Q}(\Delta P^{(\mathbf{k})})}{\mathcal{Q}U} \cdot \frac{U_n}{\Delta P^{(\mathbf{k})}}$$
(76a)

$$\Delta \beta_{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}}^{(\mathbf{k})} = 2\left(\frac{\alpha_{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}}^{*} + \beta_{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}}^{(\mathbf{k})} \mathbf{t} g^{2} \varphi_{\mathbf{n}}^{(\mathbf{k})}}{1 + \mathbf{t} g^{2} \varphi_{\mathbf{n}}^{(\mathbf{k})}} - 1\right) = \frac{\partial (\Delta Q^{(\mathbf{k})})}{\partial U} \cdot \frac{U_{\mathbf{n}}}{\Delta Q_{\mathbf{n}}^{(\mathbf{k})}}$$
(76b)

Z porównania (75a) i (75b) oraz (76a) i (76b) wynika, że

$$\Delta \alpha_{U_{n}} = \Delta \beta_{U_{n}}$$

$$\Delta \alpha_{U_{n}}^{(k)} = \Delta \beta_{U_{n}}^{(k)}$$
(77)



Rys. 34. Wykresy zależności $\Delta \alpha_{u_{2n}}^{(k)} = \Delta \beta_{u_{2n}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)})$. War-

tość odciętej punktu początkowego każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru, przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości.Większe współczynniki mocy od współczynnika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru

Na rys. 34 podano wykresy zależności $\Delta \beta_{U_{zn}}^{(k)} = \Delta \alpha_{U_{zn}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{zn}^{(k)}).$

Zmiana częstotliwości w układzie, wywołując zmianę reaktancji wzdłużnych oraz zmianę pobieranej mocy czynnej i biernej według częstotliwościowych charakterystyk odbioru – wywołuje zmianę strat wzdłużnych mocy czynnej i biernej zgodnie z częstotliwościowymi charakterystykami $\Delta P = F(f)$ i $\Delta Q=F(f)$. Współczynniki względnego nachylenia tych charakterystyk można przedstawić wzorami

$$\Delta \alpha_{f_n} = 2 \frac{\alpha_{f_n} + \beta_{f_n} t g^2 \varphi_n}{1 + t g^2 \varphi_n} = \frac{\Im(\Delta P)}{\Im f} \cdot \frac{f_n}{\Delta P_n}$$
(782)

$$\Delta \beta_{\underline{r}_{n}} = 2 \frac{\alpha_{\underline{r}_{n}} + \beta_{\underline{r}_{n}} tg^{2} \varphi_{n}}{1 + tg^{2} \varphi_{n}} + 1 = \frac{\Im(\Delta Q)}{\Im f} \cdot \frac{f_{n}}{\Delta Q_{n}}$$
(78b)

- a po zastosowaniu kompensacji mocy biernej odbioru

$$\Delta \alpha_{\underline{\mathbf{f}}_{n}}^{(\mathbf{k})} = 2 \frac{\alpha_{\underline{\mathbf{f}}_{n}} + \beta_{\underline{\mathbf{f}}_{n}}^{(\mathbf{k})} \cdot \mathbf{t}g^{2}\varphi_{n}^{(\mathbf{k})}}{1 + \mathbf{t}g^{2}\varphi_{n}^{(\mathbf{k})}} = \frac{\vartheta(\Delta \mathbf{p}^{(\mathbf{k})})}{\vartheta \mathbf{f}} \frac{\mathbf{f}_{n}}{\Delta \mathbf{q}_{n}^{(\mathbf{k})}}$$
(79a)

$$\Delta \beta_{1n}^{(k)} = 2 \frac{\varphi_{n}^{(k)} + \beta_{1n}^{(k)} + tg^{2}\varphi_{n}^{(k)}}{1 + tg^{2}\varphi_{n}^{(k)}} + 1 = \frac{\partial(\Delta \varphi^{(k)})}{\partial f} \cdot \frac{f_{n}}{\Delta \varphi_{n}^{(k)}}$$
(79b)

Ponjeważ zmianie częstotliwości w systemie towarzyszy zmiana napięcia w węzłach, dlatego wpływ zmiany częstotliwości na straty wzdłużne wynika z bezpośredniego wpływu częstotliwości na straty oraz ponadto z wpływu pośredniego – wynikającego z wpływu zmiany napięcia na straty, wywołanej zmianą częstotliwości. Zatem ogólnie

$$\Delta P = F(f, U)$$
(80)

Różniczkując te zależności względem częstotliwości otrzymuje się

$$\frac{d(\Delta P)}{df} = \frac{\vartheta(\Delta P)}{\vartheta f} + \frac{\vartheta(\Delta P)}{\vartheta U} \cdot \frac{dU}{df}$$
(81)

$$\frac{\mathrm{d}(\Delta Q)}{\mathrm{d}f} = \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial f} + \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial U} \cdot \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}f}$$
(82)

Po wprowadzeniu jednostek względnych

$$\Delta \alpha_{f,U_n} = 2 \left[\frac{\alpha_{f_n} + \beta_{f_n} tg^2 \varphi_n}{1 + tg^2 \varphi_n} \right] + \left[2 \left(\frac{\alpha_{U_n} + \beta_{U_n} tg^2 \varphi_n}{1 + tg^2 \varphi_n} - 1 \right) \right] \delta U_{2_n}$$
(83)

$$\Delta \beta_{\mathbf{f}}, \mathbf{U}_{\mathbf{n}} = \left[2 \frac{\alpha_{\mathbf{f}_{\mathbf{n}}} + \beta_{\mathbf{f}_{\mathbf{n}}} \mathrm{tg}^{2} \varphi_{\mathbf{n}}}{1 + \mathrm{tg}^{2} \varphi_{\mathbf{n}}} + 1 \right] + \left[2 \left(\frac{\alpha_{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}} + \beta_{\mathbf{U}_{\mathbf{n}}} \mathrm{tg}^{2} \varphi_{\mathbf{n}}}{1 + \mathrm{tg}^{2} \varphi_{\mathbf{n}}} - 1 \right) \delta \mathbf{U}_{2_{\mathbf{n}}} \right]$$

$$(84)$$

i odpowiednio

$$\Delta \alpha_{1,U_{n}}^{(k)} = 2 \left[\frac{\alpha_{f_{n}}^{*} + \beta_{f_{n}}^{(k)} + g^{2} \varphi_{n}^{(k)}}{1 + tg^{2} \varphi_{n}^{(k)}} \right] + \left[2 \left(\frac{\alpha_{U_{n}}^{*} + \beta_{U_{n}}^{(k)} + g^{2} \varphi_{n}^{(k)}}{1 + tg^{2} \varphi_{n}^{(k)}} - 1 \right) \right] \delta U_{2_{n}}^{(k)}$$
(85)

$$\Delta \beta_{\mathbf{f},\mathbf{U}_{n}}^{(\mathbf{k})} = \left[2 \frac{\alpha_{\mathbf{f}_{n}}^{} + \beta_{\mathbf{f}_{n}}^{(\mathbf{k})} \cdot \mathrm{tg}^{2} \varphi_{n}^{(\mathbf{k})}}{1 + \mathrm{tg}^{2} \varphi_{n}^{(\mathbf{k})}} + 1 \right] + \left[2 \left(\frac{\alpha_{\mathbf{U}_{n}}^{} + \beta_{\mathbf{U}_{n}}^{(\mathbf{k})} \cdot \mathrm{tg}^{2} \varphi_{n}^{(\mathbf{k})}}{1 + \mathrm{tg}^{2} \varphi_{n}^{(\mathbf{k})}} - 1 \right] \delta_{\mathbf{U}_{n}}^{(\mathbf{k})}$$
(86)



Rys. 35. Wykresy zależności $\Delta \alpha_{2n}^{(k)} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)}) -$ linie ciągłe $\Delta \alpha_{1,u} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)}) -$ linie przerywane. Wartość odcietej punktu początkowego każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru, przy znanionowym poziomie napięcia i częstotliwości. Większe współczynniki mocy od współczynnika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru

Analiza wzorów (83) i (85) została przeprowadzona w publikacji [8]. Na rys. 35 przedstawiono wykresy zależności współczynników

$$\Delta \alpha_{f_{2n}}^{(k)} = \mathbb{P}(\cos \varphi_{2n}^{(k)}) \ \ \Delta \alpha_{f_{3} U_{2n}}^{(k)} = \mathbb{P}(\cos \varphi_{2n}^{(k)})$$

- wykorzystując do ich wyznaczenia przeciętne wartości współczynników α_{1} , $\alpha_{U_{2n}}$, β_{1} i $\beta_{U_{2n}}$, odpowiadające typowym zakładom przemysłowym oraz zakładając, że współczynnik oU₂ = $\delta U_{2n}^{(k)} = 1,0$. Z wykresów tych wynika, że dla naturalnych współczynników mocy $\cos \varphi_{2n} \leq 0,70$ współczynniki $\Delta \alpha_{2n}^{(k)}$ są ujemne - co oznacza, że zmniejszeniu częstotliwości towarzyszy wzrost strat mocy czynnej, przy czym w miarę wzrostu stopnia kompensacji mocy biernej odbioru maleją bezwzględne wartości współczynników $\Delta \alpha_{2n}^{(k)}$ Oznacza to, że wprawdzie straty nadal wzrastają, ale w znacznie mniejszym stopniu. Warto jednak zauwsżyć, że jeśli zmniejszeniu częstotliwości towarzyszy zmniejszenie napięcia - to spełniona jest nierówność

$$\left|\Delta \alpha_{f,U_{\text{ZN}}}^{(k)}\right| < \left|\Delta \alpha_{f_{\text{ZN}}}^{(k)}\right| \qquad (87)$$

Zatem przez właściwe uzależnienie napięcia od częstotliwości można ograniczyć wpływ zmniejszenia częstotliwości na wzrost strat wzdłużnych mocy czynnej.Dla naturalnych współczynników mocy, mieszczących się w zakresie 0,75 $< \cos \varphi_{\rm ZN} < 0,85$ współczynniki $\Delta \alpha_{\rm p}$ i mogą przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Jeśli $\Delta \alpha_{\rm r} > 0$ - to oznacza, że zmniejszeniu częstotliwości towarzyszy zmniejszenie strat wzdłużnych mocy czynnej. Na ogół i tu występuje korzystny wpływ zmiazy napięcia - wywcłanej zmianą częstotliwości - na straty wzdłużne. W przypadku com zm = 0,85 zmiana napięcia powoduje,że np. przy $\cos \varphi_{\rm ZN}^{\rm (k)} > 0,90$ zachodzi nierówność $\Delta \alpha_{\rm f}^{\rm (k)} > \Delta \alpha_{\rm f,U_{\rm SN}}^{\rm (k)}$ - a zatem tutaj dochodzi się do wniesku wręcz odwrotnego,niż ostatnia



Rys. 36. Wykresy zeleżności $\Delta \beta_{fn}^{(k)} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)}) - \text{linie ciągle}$ i $\Delta \beta_{f,u_{2n}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{2n}^{(k)}) - \text{linie przerywane. Wartość odciętej}$

punktu początkowego każdej krzywej określona jest przez wartość naturalnego współczynnika mocy odbioru, przy znamionowym poziomie napięcia i częstotliwości. Większe współczynniki mocy od współczynnika naturalnego odnoszą się do stanu częściowej kompensacji mocy biernej odbioru W większości zakładów przemysłowych wartości naturalnych współczynników mocy mieszczą się w zakresie 0,60 $< \cos \varphi_{\rm ZN} < 0,75$ – a.dla tego zakresu jednoczesne obniżenie napięcia przy obniżonej częstotliwości wpływa na zmniejszenie wzrostu strat wzdłużnych mocy czynnej (por. na rys.3.5 zależności $\Delta \alpha_{\rm ZN}^{(k)} = F/\cos \varphi_{\rm ZN}^{(k)}$) – linie ciągłe, z odpowiednimi zależnościami $\Delta \alpha_{\rm T,U_{ZN}}^{(k)} = F/\cos \varphi_{\rm ZN}^{(k)}$

(- linie przerywane).

W analogiczny sposób można przeprowadzić analizę wpływu zmiany częstotliwości na straty wzdłużne mocy biernej. Na rys. 36 przedstawiono wykresy zależności

$$\Delta \beta_{\text{f}_{\text{zn}}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{\text{zn}}^{(k)}) \text{ oraz } \Delta \beta_{\text{f}_{\text{J}},\text{U}_{\text{zn}}}^{(k)} = F(\cos \varphi_{\text{zn}}^{(k)})$$

Z wykresów tych wynika, że jednoczesne obniżenie napięcia przy obniżonej częstotliwości wpływa na zmniejszenie wzrostu strat wzdłużnych mocy biernej, występujących w układach przesyłowych.

7. ZAKOŃCZENIE

Z całokształtu przeprowadzonych rozważań wynika, że zmiany napięcia w węzłach sieciowych - na skutek zmiany częstotliwości w systemie, głównie determinują zmiany napięcia w węzłach pracy równoległej generatorów. Te ostatnie zaś głównie zależą od nachylenia charakterystyki U = F(f) regulatorów napięcia.

Jak wspomniano na wstępie, między konstruktorami a emergetykami nie ma całkowitej zgodności co do potrzeby i celowości nadania regulatorom napięcia odpowiedniej charakterystyki U = = F(f) - w sensie zmniejszenia wartości zadanej przy obniżeniu częstotliwości. Konstruktorzy są na ogół zdania, że regulatory napięcia nie powinny reagować na odchylenia częstotliwości. Trzeba jednak odróżnić pracę regulatorów napięcia w normalnych

i awaryjnych warunkach pracy systemu elektroenergetycznego.

W normalnych warunkach pracy systemu można rozróżnić SW0bodne wahania częstotliwości dookoła wartości średniej i odchylenia średniej częstotliwości od poziomu znamionowego. Jeśli chodzi o swobodne wahania częstotliwości, to przeprowadzone pomiary w krajowym systemie elektroenergetycznym wykazały, że swobodne wahania częstotliwości mają charakter przypadkowy, które podlegają prawu Gaussa^{x)}. Stwierdzono, że wahania z 99% prawdopodobieństwem mieszczą się w zakresie 0,012 - 0,024 Hz^{XX)}. Badania przeprowadzone przez prof. dr J. Kożuchowskiego [22] wykazały, że wahania te zmniejszają się - w miarę rozbudowy systemu lub łączenia poszczególnych systemów w jeden zespół energetyczny - w przybliżeniu proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z sumarycznego obciążenia wszystkich współpracujących elektrowni. Wynika stąd, że w miarę wzrostu mocy systemów należy oczekiwać dalszego ograniczania zakresu swobodnych wahań czestotliwości.

Strefa tolerancji odchyleń częstotliwości od poziomu znanionowego jest uwarunkowana koniecznością utrzymania średniej mocy wymiennej. Stawiane są żądania utrzymania częstotliwości w paśnie $\leq 0,2\%$ częstotliwości znamionowej, a nawet w paśmie 0,05 Hz – a więc w granicach $\pm 0,025$ Hz. Dolną granicę tej strefy tolerancji wyznaczają swobodne wahania częstotliwości – nie dające się opanować w procesie regulacji [22, 27]. W energetyce krajowej istnieje pogląd o możliwości prowadzenia regulacji czę stotliwości z dokładnością $\pm 0,15$ Hz ($\pm 0,3\%$ f_{zn}), nawet bez konieczności wprowadzania automatycznej regulacji wtórnej.Istnieją jednak podstawy by sądzić, że wobec daleko zaawansowanych prac związanych z wprowadzeniem automatycznej regulacji częstotliwości i mocy wymiennej w krajowym systemie elektroenergetycznym^{XXX)} – już w niedalekiej przyszłości będzie utrzymywana częstotliwość w znacznie węższym zakresie niż obecnie

I) Pomiary takie przeprowadził Zakład Układów Elektroenergetycznych Politechniki Sląskiej.

T) Podobne wyniki uzyskał dr inż. T. Halawa [17].

rrx)Prace te prowadzi Instytut Automatyzacji Systemów we Wrocławiu.
tj. ok. + 0,05 Hz w porównaniu ze stanem obecnym ok. + 0,20 Hz. Warunkiem koniecznym realizacji tych zamierzeń jest oczywiście nie występowanie niedoboru mocy czynnej.

W świetle przytoczonych wyżej rozważań można sądzić, że wahania częstotliwości w normalnych warunkach pracy systemu nie wpływają już obecnie – a tym bardziej w przyszłości – na działanie regulatora napięcia, którego człon pomiarowo-porównawczy jest uczulony na zmianę częstotliwości. Tym samym te wahania częstotliwości nie wpływają na napięcie w węzłach systemu.

W stanach awaryjnych systemu lub w okresach przeciążenia systemu mocą czynną, kiedy w wyniku niedoboru mocy czynnej obniża się częstotliwość w systemie – jednocześnie występujące obniżenie napięcia powoduje zmniejszenie poboru mocy czynnej odpowiednio do napięciowych charakterystyk P = F(U). Pobór mocy czynnej obniża się zatem równocześnie według charakterystyk P= F(f) i P = F(U). Wykorzystując zależność (8) możemy określić względną zmianę tego poboru mocy czynnej

 $\alpha_{f,U_n} = \alpha_{f_n} + \delta J_{Z_n} \cdot \alpha_{U_n}$ (88.)

Współczynnik $\delta U_{2n} > 0$, również $\alpha_{U_n} > 0$, dlatego spełniona jest zawsze nier wność

at, Un > offin

Stąd występująca równocześnie ze zmianą częstotliwości zmiana napięcia przeciwdziała niedoborowi mocy czynnej.Nawet w przypadku, gdy $\alpha_{f} = 0$ przy odbiorze o charakterze oporowym obniżenia częstotliwości towarzyszy zmniejszenie poboru mocy czynnej ($\alpha_{f,U_n} > 0$), tylko dzięki pośredniemu wpływowi zmiany napięcia na pobieraną moc czynną – na skutek zmian częstotliwosci

Zmniejszona częstotliwość w systemie poweduje na ogółwzrost strat wzdłużnych mocy czynnej. Jeśli zmniejszeniu częstotliwości towarzyszy zmniejszenie się napięcia w węzłach,wtedy wzrost tych strat jest już znacznie złagodzony (p. rys. 35) co sprzyja zrównoważeniu bilansu mocy czynnej.

W świetle przeprowadzonych dotąd rozważań uzasadniona jest tendencja zmierzająca do uzależnienia członu pomiarowo-porównawczego regulatora napięcia od częstotliwości.Wprawdzie człony pomiarowo-porównawcze regulatorów różnych typów reagują również na odchylenia częstotliwości, ale często nie jest to wynikiem świadomej myśli konstruktora.

Uzależnienie członu pomiarowo-porównawczego od częstotliwości nie nastręcza większych trudności konstruktorom regulatorów, w szczególności regulatorów bez strefy nieczułości. Pozostaje do określenia wartość współczynnika nachylenia k , pozn żądana z punktu widzenia wpływu na odciążenie systemu. Zbyt duża wartość współczynnika k może być kłopotliwa z uwagi na przejściowe zwyżki częstotliwości przy awaryjnych odstawieniach generatorów. W przypadku hydrogeneratorów pożądana jest wartość k = 0 z uwagi na duże prędkości rozbiegu zespołów, dorzn chodzące do 200%. W przypadku turbozespołów zwyżki prędkości przy awaryjnych odstawieniach nie mogą przekroczyć 15%.

Przy współczynniku k_{rzn} = 1,0, moment synchronizujący między współpracującymi generatorami jest jeszcze utrzymany na prawie niezmienionej wartości, jak przy znamionowej częstotliwości, dzięki analogicznemu uzależnieniu napięcia i reaktancji wiążącej współpracujące generatory od częstotliwości. Moment synchronizujący między dwoma węzłami pracy równoległej,zasilanymi generatorami o regulowanym napięciu - przy upraszczającym założeniu powiązania węzłów reaktancją indukcyjną można przedstawić

$$M = \frac{f_{2n}}{f_n} \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{12}} \cdot \cos \delta_{12}$$
(89)

gdzie:

- X12 reaktancja wiążąca węzły pracy równoległej,
 - 12 kąt rozchyłu między wektorami napięć węzłowych U₁ 1 U₂.

Przy stałym kącie rozchyłu wektorów i przy proporcjonalnym uzależnieniu U₁ i U₂ od częstotliwości nie zmienia się moment synchronizujący. Przy uwzględnieniu rezystancji impedancji międzywęzłowej otrzymuje się nieznaczne zmniejszenie momentu synchronizującego przy zmniejszeniu częstotliwości.

Z przedstawionej dyskusji wynika, że stabilność statyczna oraz zapas stabilności systemu elektroenergetycznego przy zmniejszeniu częstoliwości jeszcze pozostaje w przybliżeniu na tym samym lub tylko na niewiele mniejszym poziomie jak przy częstotliwości znamionowej, jeśli regulatory napięcia uczulone są na częstotliwość odpowiednio do współczynnika k = 1,0. Wartości większe współczynnika k byłyby już nie wskazane, ze względu na uszczuplenie stabilności statycznej. Podobny pogląd na korelację współczynnika k i stabilności statyczzn nej, można znaleźć [30].

Optymalnym rozwiązaniem z punktu widzenia wpływu na odciążenie systemu byłoby uczulenie członu pomiarowo-porównawczego regulatorów na częstotliwość ze współczynnikiem $k_r = 1,0$ rylko w przedziale odchyłek częstotliwości $\pm 5\%$ f_{zn}. Poza tym przedziałem człon pomiarowo-porównawczy powinien być mniej lub niewrażliwy na zmiany częstotliwości. Realizacja takiej charakterystyki nie nastręczałaby większych trudności konstruktorom regulatorów. Można ją zrealizować za pomocą odpowiedniej przystawki do regulatora, który miałby człon pomiarowo-porównawczy od częstotliwości niezależny.

Naturalne zmiany częstotliwości w systemie elektroenergetycznym opisane są równaniem [19]

$$\frac{\Delta \mathbf{f}}{\mathbf{f}_{zn}} = -\frac{\Delta \mathbf{P}_{ukk}}{\mathbf{P}_{o_{zn}}} \cdot \frac{1}{\mathbf{g}^{k}\mathbf{g} + \alpha_{f,U_{n}}}$$
(90)

gdzie:

ΔPukł - przyrost mocy czynnej w systemie, wywołujący zmianę częstotliwości.

- Pozn obciążenie systemu przed naruszeniem równowagi między mocą czynną wytwarzaną a pobieraną,
 - γ współczynnik rezerwy mocy czynnej w systemie,

 współczynnik względnego nachylenia częstotliwościowej charakterystyki statycznej turbozespołów systemu elektroenergetycznego.

W normalnych warunkach pracy systemu, gdy turbozespoły nie są w pełni obciążone – iloczyn $\mathcal{R}_k \gg \mathfrak{C}_{f,U_n}$.Wtedy współczynnik \mathfrak{C}_{f,U_n} nie ma praktycznie większego wpływu na zachowanie się częstotliwości w systemie. Gdy wszystkie turbozespoły w systemie osiągną swoją moc maksymalną, wówczas $\mathcal{R}_k g_{\Sigma} = 0$ i zachowanie się częstotliwości w systemie odpowiada częstotliwościowej charakterystyce statycznej odbioru \mathfrak{K}_{f,U_n} .Wtedy równanie (90) przyjmie postać

$$\frac{\Delta \mathbf{f}}{\mathbf{f}_{2n}} = -\frac{\Delta \mathbf{P}_{ukl}}{\mathbf{P}_{o_{2n}\Sigma}} \cdot \frac{1}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{f},U_n}}$$
(91)

W takim przypadku dopiero istotnego znaczenia nabiera uzależnienie członu pomiarowo-porównawczego regulatorów napięcia od cząstotliwości.

Z przytoczonych dotąd rozważań wynika, że przez uzależnienie członu pomiarowo-porównawczego regulatorów napięcia od częstotliwości, można złagodzić skutki awaryjnego ubytku mocy czynnej w systemie - w szczególności w przypadku awaryjnego rozcięcia systemu na grupy autonomiczne, względnie ográniczyć konieczne wyłączenia pewnych grup odbiorów w okresie przeciążenia systemu mocą czynną. Powstaje jednak pytanie - jak długo trwa efekt zmniejszenia poboru mocy czynnej, wynikający z obniżenia częstotliwości i napięcia oraz jak duży może być margines tej "rezerwy"? - Energetycy francuscy reprezentują pogląd, że już po upływie jednej godziny pobór mocy czynne; zwiększa się do poziomu, który istniał przed zmniejszeniem częstotliwości, a margines przejściowej "rezerwy" nie przekracza kilku procent [31]. Tego rodzaju margines "rezerwy" nie jest jed

74

kgr

nak bez znaczenia w niektórych systemach i jest on wykorzystywany w czasie trwania obciążenia szczytowego w okresie jesienno-zîmowym. W systemie brytyjskim, uzyskuje się przez świadome obniżenie czestotliwości i napięcia zmniejszenic poboru mocy czynnej o ok. 7% w czasie trwania szczytu, a więc w ciągu kilku godzin [29]. 7 energetyce krajowej nie przeprowadzono badań w tym zakresie - ale można sądzić, że system krajowy zachowuje się podobnie jak system brytyjski. Celowe byłoby jednak podjęcie takich badań w polskim systemie elektroenergetycznym z jed noczesnym uwzględnieniem wpływu zmian częstotliwości i napięcia na użyteczny efekt odbioru.

14

W zakończeniu warto podkreślić, że w obecnej tendencji wprowadzania automatyzacji całego systemu, która przewiduje ciągłą zmianę nastawień regulatorów oraz stosowanie automatycznej regulacji napięcia transformatorami - uzyskane w niniejszej pracy wyniki, bazujące na stałości nastawień regulatorów, dają możliwość porównania właściwości systemu przed i po wprowadzeniu and the second second kompleksowej automatyzacji.

- and the state of the state of

LITERATURA

- Bogucki A. Wpływ zmiany częstotliwości i napięcia na moc czynną i bierną pobieraną przez odbiory układu elektroenengetycznego. Biuletyn Polit. Warszawskiej z Konf. Pom.Prac. Nauki, Warszawa 1958.
- [2] Bogucki A. Napięciowe i częstotliwościowe charakterystyki statyczne odbiorów oraz ich wpływ na straty przesyłu w sieciach średnich napięć. Praca doktorska, 1959.
- [3] Bogucki A. Eksploatacja sieci systemowych i wpływ odbiorów na system energetyczny - referat, KNiT, Warszawa, 1964.
- [4] Bogucki A. Wpływ zmiany częstotliwości i napięcia zasilania na zmianę wartości współczynników mocy zakładów przemysłowych. Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej. Elektryka z,18,1964.
- [5] Bogucki A. Wpływ zmiany napięcia zasilania i częstotliwości na moc pozorną pobieraną przez odbiory układu energetycznego. Zeszyty Nauk. Pol. Sląskiej Elektryka z. 17, 1964.
- [6] Bogucki A. Wpływ zmiany poziomu napięcia na straty przesyłu w sieciach średnich napięć. Energetyka z.7, 8, 1963.
- [7] Bogucki A. Zależność współczynnika mocy zakładów przemysłowych od napięcia zasilania. Gospodarka Paliwami i Energia. Nr 7 (102), 1963.
- [8] Bogucki A. Analiza wpływu zmiany częstotliwości na straty wzdłużne, występujące w układach sieciowych. Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej, Elektryka z. 18, 1964.
- [9] Bogucki A. Wpływ zmiany częstotliwości w układzie energetycznym na zmiany poziomów napięć w węzłach sieciowych. Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej, Elektryka z. 17, 1964.
- [10] Bogucki A., Lawera B. Wpływ zmiany częstotliwości w układzie energetycznym na zmiany poziomów napięć na szynach generatorowych. Zeszyty Nauk. Pol. Śląskiej, Energetyka z.20, 1966.
- [11] Bogucki A., Wójcik M. Napięciowe charakterystyki statyczne pobieranej mocy czynnej dla typowych grup odbiorów energetycznych. Energetyka Nr 7, 1962.
- [12] Bogucki A., Wójcik M. Równania naturalnych statycznych charakterystyk mocy biernej pobieranej przez typowe grupy odbiorów. Energetyka Nr 2, 1962.

- [13] Bogucki A., Wójcik M. Równania częstotliwościowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy czynnej dla typowych grup odbiorów. Energetyka Nr 8 1962.
- [14] Bogucki A., Wójcik M. Równanie częstotliwościowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy biernej dla typowych grup odbiorów. Energetyka Nr 5, 1963.
- [15] Bogucki A., Wójcik M. Wyniki pomiarów napięciowych i częstotliwościowych charakterystyk statycznych odbiorów.Energetyka Nr 3, 4 1959.
- [16] Bogucki A., Wójcik M. Częstotliwościowe charakterystyki statyczne odbiorów układu elektroenergetycznego.Energetyka Nr 4, 1958.
- [17] Halawa T. "yznaczenie rzeczywistej mocy regulacyjnej w systemie energetycznym. Praca doktorska Pol. Wrocławska 1963.
- [18] Jasicki Zb. Eksploatacja układów elektroenergetycznych. PVN, 1956.
- [19] Jasicki Zb., Szymik Fr., Bogucki A., Saferna J. Praca układów elektroenergetycznych, WNT Warszawa, 1965.
- [20] Johansson T., Bubenko A. Steady state voltage load characteristics. Swedish Power Board, Stockholm, 1963.
- [21] Kamiński A. Równowaga układów elektroenergetycznych, PWT 1956.
- [22] Kożuchowski J. Koncepcja systemu regulacji mocy i częstotliwości przewidzianego dla polskiego układu eLektroenergetycznego oraz wstępna ocena dotychczasowych prób regulacji. Komitet Elektrotechniki PAN, 1961 (referat).
- [23] Markowicz I.M. Reżimy Energeticzeskich Sistiem.Gosenergoizdat, Moskwa 1963.
- [24] Paszek Wł. Zastosowanie wzmacniaczy magnetycznych do układów regulacji napięcia. Komitet Elektrotechniki PAN, PWT, 1967.
- [25] Paszek W1. Wybrane zagadnienia regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Przegląd Elektrotechniczny Nr 10 1961.
- [26] Paszek W1. O problemach i pojęcia w technice regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Archiwum Automatyki i Telemechaniki, t. I, z. 1, 1961.
- [27] Skoczyński Z. Prace prowadzone w Polsce na tle zagadnień regulacji mocy wymiennej i częstotliwości - Koreferat, Komitet Elektryfikacji PAN, 1962.
- [28] Gaden I. Determinations experimentale de l'influence de la frequence sur la puissance absorbes par un resseau de consommations. Bull. Soc. Franc. 1947.

77

- [29] Cash P.W., Scott E.C. Secwrity of supply in the planning and operation of european power systems. UNIPEDE -Study Committee on International Interconnections and Large Systems, 1966.
- [30] Cukernik L.W. Zawisimość naprjażenija sinchronnych generatorow podderziwajemogo pri awtomaticzeskom regulirowanii ot izmencija czastoty. Elektriczeskie Stancji Nr 10, 1950.
- [31] Ailleret P. Energetique les besoins d'energie.Eyrolles, Paris, 1963.
- 32] Hellman W. Elektrownie wodne, PWT 1959.

STRESZCZENIE

W pracy rozpatrzono problem współzależności mian częstotliwości i napięcia w węzłach odbiorczych i węzłach pracy równoległej generatorów, uwzględniając charakterystyki statyczne $P(f, U), Q(f, U) \quad \Delta U(f, U), \quad \Delta P(f, U), \quad \Delta Q(f, U) \quad oraz U(f)$ członów pomiarowo-porównawczych regulatorów napięcia.

Metoda użyta przy rozpatrywaniu problemu polega na analizie funkcjonalnych związków między współczynnikami względnego nachylenia odpowiednich częstotliwościowych i napięciowych charakterystyk statycznych.

Z przytoczonych w pracy rozważań wynika, że przez właściwe uzależnienie członu pomiarowo-porównawczego regulatorów napięcia od częstotliwości, można złagodzić skutki awaryjnego ubytku mocy czynnej w systemie, względnie ograniczyć konieczne wyłączenia pewnych grup odbiorów w okresie przeciążenia systemu mocą czynną.

Wnioski wysnute z analizy pokrywają się z wynikami pomiarów, jakie przeprowadzono w krajowym systemie elektroenergetycznym.

PESWME

этиботе рассмотрена проблема взаинозависимости изменении изменения в приёмных и рабочих узлах параллельно ключённых генераторов, учитывая статические характеристики (f,U), $\Omega(f,U),\Delta U(f, U),\Delta P(f, U),\Delta \Omega(f, U)$ а также U(f) измерительно-сопоставительных узлов регулятсров напряжения.

Метсд применённый при рассматривании вспроса состоит в анализе функциональных связей между коэффициентами относительного наклона соответствующих частотных и статических характеристик напряжений. Из приведённых в работе рассуждений следует, чтс путём состветствующей зависимссти измерительно-сопоставительного узла регулятсров напряжений от частоты можно смягчить последствия аварийной убыли активной мощности в системе или ограничить необходимые выключения некоторых групп приёмов в период перегрузки системы активной мощностью.

Зыводы, вытекающие из анализа, срвпадают с результатами измерений, какие были проведены в электроэнергетической системе Польши.

SUMMARY

In the paper there was considered the problem of correlation of voltage and frequency variations in receiving nodes and generators parallel operation nodes. The static characteristics P(f, U), Q(f, U), $\Delta U(f, U)$, $\Delta P(f, U)$, $\Delta Q(f, U)$, and U(f)of measuring-comparison units of voltage regulators have been taken into account.

The method used to examine the problem is based on the analysis of functional connections betwwen relative inclination coefficients of corresponding frequency and voltage static characteristics.

It results from the discussion enclosed, that by means of appropriate voltage regulators measuring - comparison units dependence on frequency, the effects of break-down loss of active power in system can be diminshed, or necessary trippings of some groups of receivers during active power overloads in system can be limited.

The conclussions from the analysis agree with results of the measurements that were carried out in Polish power system.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Problem der gegenseitigen Abhängigkeit von Spannungsund Frequenzänderungen in Leistungsbnahme-knotenpunkten und in Verbundknotenpunkten von Synchrongeneratoren wird untersucht. Dabei wurden die statischen Kennlinien: $P(f, U), Q(f,U), \Delta U(f,U), \Delta U(f,U), \Delta P(f, U), \Delta Q(f, U)$ und U(f) der Mess-Vergleichsglieder von Spannungsreglern berücksichtigt.

Die zur Untersuchung des Problems angewandte Methode gründet auf der Analyse der funktionellen Beziehungen zwischen den relativen Neigungskoeffizienten entsprechender statischen Frequenz - Spannungskennlinien.

Aus der Analyse ergibt sich die Mögligkeit durch geeignete Frequenz-Abhängigkeit der Mess-Vergleichsglieder von Spannungsreglern die Folgen von Wirkleistungsausfall beim Störungsfall im elektrischen Netz zu mildern, beziehungsweise die notwendigen Ausschaltungen gewisser Abnehmergruppen bei Überlastung des elektrischen zu begrenzen.

Die aus der Analyse hervorgehenden Folgerungen ubereinstimmen mit den Massergebnissen.



ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

ukazują się w następujących seriach:

Α. Αυτοματγκα

B. BUDOWNICTWO

Ch. CHEMIA

- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICTWO
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA

MF. MATEMATYKA-FIZYKA

M. MECHANIKA

NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się zeszyty

serii E.

| Elektryka | z. | 1, | 1954 | r., | s. | 76, | zł | 9,10 |
|-----------|----|--------------|------|-----|----|------|----|-------|
| Elektryka | z. | 2, | 1956 | r., | s. | 82, | zł | 11,— |
| Elektryka | z. | 3, | 1956 | r., | s. | 102, | zł | 14,50 |
| Elektryka | z. | 4, | 1957 | r., | s. | 113, | zł | 21,75 |
| Elektryka | z. | 5, | 1959 | r., | s. | 152, | zł | 20,- |
| Elektryka | z. | 6, | 1960 | r., | s. | 131, | zł | 23,45 |
| Elektryka | z. | 7, | 1961 | r., | s. | 42, | zł | 3,40 |
| Elektryka | z. | 8, | 1961 | r., | s. | 147, | zł | 11,30 |
| Elektryka | z. | 9, | 1961 | r., | s. | 128, | zł | 26,25 |
| Elektryka | z. | 10, | 1961 | r., | s | 52, | zł | 3,90 |
| Elektryka | z. | 11, | 1961 | r., | s. | 128, | zł | 22,80 |
| Elektryka | z. | 12, | 1962 | r., | s. | 162, | zł | 12,20 |
| Elektryka | z. | 13, | 1962 | r., | s. | 127, | zł | 9,80 |
| Elektryka | z. | 14, | 1963 | r., | s. | 157, | zł | 9,40 |
| Elektryka | z. | 15, | 1963 | r., | s. | 58, | zł | 3,50 |
| Elektryka | z. | 16, | 1963 | r., | s. | 219, | zł | 11,40 |
| Elektryka | z. | 17, | 1964 | r., | s. | 272, | zł | 15,60 |
| Elektryka | z. | 18, | 1964 | r., | s. | 161, | zł | 8.30 |
| Elektryka | z. | 19, | 1964 | r., | s. | 119, | zł | 6,50 |
| Elektryka | z. | 20, | 1966 | r., | s. | 184, | zł | 13,— |
| Elektryka | z. | 21, | 1966 | r., | s. | 263, | zł | 16,— |
| Elektryka | z. | 2 2 , | 1967 | r., | s. | 114, | zł | 7,— |
| Elektryka | z. | 23, | 1968 | r., | s. | 113, | zł | 7,— |
| Elektryka | z. | 24, | 1969 | r., | s. | 184, | zł | 10,— |
| Elektryka | z. | 25, | 1969 | r., | s. | 134, | zł | 8, |

