

EDWARD NIWIŃSKI

Były pracownik Katedry
Miernictwa Elektrycznego

**METODA OCENY DOKŁADNOŚCI POMIARU MOCY CZYNNEJ
GENERATORÓW ZE WZGLĘDU NA UCHYBY PRZEKŁADNIKÓW
I MIERNIKÓW MOCY**

Streszczenie. W artykule omówiona jest metoda przybliżonej oceny dokładności pomiaru mocy na zaciskach generatorów trójfazowych (na wysokim napięciu) w warunkach ruchowych, przy pomiarach gwarancyjnych lub eksploatacyjnych turbozespołów.

Przytoczone poniżej rozważania dotyczą zagadnienia związanego z pomiarami mocy czynnej na zaciskach turbogeneratorów prądu 3-fazowego. Rozpatrywane są pomiary na wysokim napięciu (zwykle 6-10 kV) - w układzie Arona, z zastosowaniem przekładników prądowych i napięciowych. Dane wyjściowe: - dane znamionowe generatora, stopień jego (możliwie równomiernego) obciążenia (zwykle od 100 do 20% mocy znamionowej), $\cos \varphi$ w granicach $1,0 \div 0,5$ (indukcyjny). Poza tym dane znamionowe przekładników (przede wszystkim klasy ich dokładności), a również i watomierzy. Natomiast (prawie z reguły) nie są znane odpowiednie charakterystyki uchybów przekładników, wobec czego nie są aktualne i wykresy uchybów watomierzy.

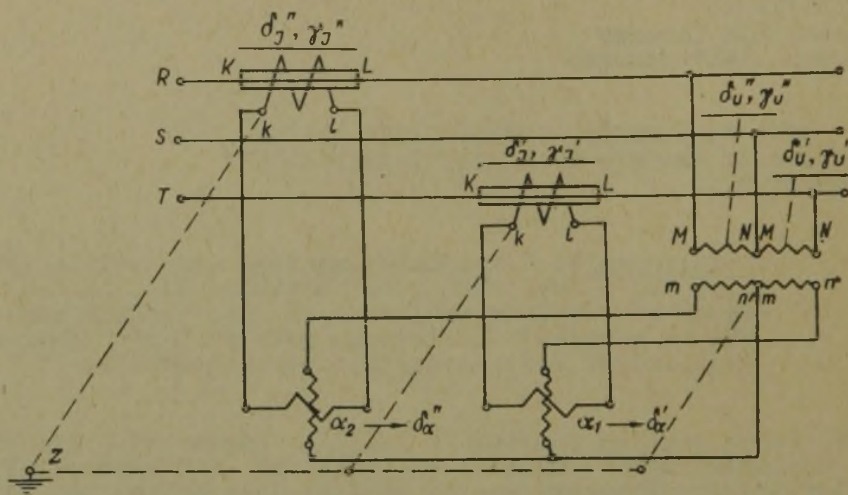
W oparciu o ustalone warunki pomiarów, normy dotyczące stosowanych narzędzi mierniczych oraz zasady rachunku prawdopodobieństwa, autor wykorzystując własne doświadczenie pragnie przedstawić opracowaną przez niego metodę oceny dokładności omawianych pomiarów elektrycznych, ściśle powiązanych z możliwie dokładnym ustaleniem jednostkowego zużycia ciepła przez turbozespół w określonych warunkach (kcal/kWh) - przy pomiarach gwarancyjnych wg eksploatacyjnych.

A. Zasadniczy układ pomiarowy oraz czynniki powodujące powstanie uchybów przy pośrednim pomiarze mocy. Pojęcie uchybu zespołowego

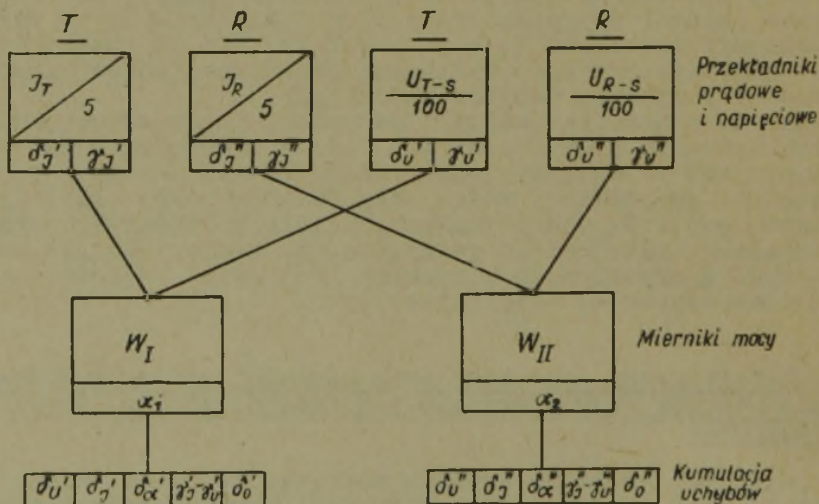
Układ pomiarowy Arona na wysokim napięciu ze wskazaniem lokalizacji (miejsce powstawania) poszczególnych uchybów bezwzględnych jest przedstawiony na rys. 1.

Na rys. 2 podany został obrazowo układ kumulacji tych uchybów, ujawniających się ostatecznie przez pewne zmiany wychyleń

watomierzy. W obliczeniach natomiast będziemy mieli do czynienia z odpowiednimi uchybami podawanymi w % od wartości mocy mierzonej.



Rys. 1. Pomiar pośredni mocy 3 faz. w układzie Arona. Lokalizacja uchybów przekładników i mierników mocy



Rys. 2. Schemat kumulacji uchybów przy pomiarze pośrednim mocy w układzie Arona

Przyjęte oznaczenia:

- $\delta_J\%$ - uchyb wzg. prądowy - Przekładników prądowych lub napięciowych, spowodowany przez
 $\delta_U\%$ - uchyb wzg. napięciowy - ich jednoimienne uchyby bezwzględne,
 γ_J, γ_U - uchyby katowe przekładników prądowych wzg. napięciowych podawane w min,
 $\delta_W\%$ - uchyb wzg. pomiaru mocy powodowany uchybami watomierzy,
 $\delta\varphi\%$ - uchyb wzg. pomiaru mocy powodowany przez zespołowy wpływ uchybów katowych przekładników (γ_J i γ_U) min,
 δ'_0 i δ''_0 - uchyby odczytów (rys. 2)

Określenie poszczególnych uchybów pomiaru powodowanych narzędziami mierniczymi

Uchyby wzg. $\delta_J, \delta_U(\%)$ powodowane przekładnikami wynikają z ich charakterystyk, sporządzonych dla odpowiednich VA i $\cos\varphi$ w obwodach wtórnych (w funkcji wielkości mierzonych pierwotnych) ($I_1 - U_1$), a więc i uzależnionej od nich mocy mierzonej.

Uchyby wzg. powodowane watomierzami (δ_W) są ustalone dla odnośnych wychyleń α , na podstawie charakterystyk ich uchybów bezwzględnych $\delta_\alpha = f(\alpha)$, wzdl. wzoru: $\delta_W = \pm \frac{\delta_\alpha}{\alpha} \cdot 100\%$.

Uchyby powodowane uchybem katowym zespołowym przekładników ($\gamma_J - \gamma_U$) min, obliczamy dla każdego systemu z osobna wg wzoru:

$$\delta_\varphi = \pm 0.029 (\gamma_J - \gamma_U) \cdot \text{tg} (30 \pm \varphi)$$

z charakterystyk odnośnych uchybów katowych.

W rozważanym układzie pomiarowym występują dwa systemy jednofazowe:

1) związany z fazą "T" (wyprzedzającą) i z watomierzem W_I (wychylenia α_1 - proporc. do $\cos (30 - \varphi)$ oraz z uchybami wzg. - $\delta'_J, \delta'_U, \delta'_W, \delta'_\varphi, (\%)$,

2) związany z fazą "R" i z watomierzem $-W_{II}$ (wychylenia α_2 - proporc. do $\cos (30 + \varphi)$ - oraz z uchybami wzg. $\delta'_J, \delta'_U, \delta'_W, \delta'_\varphi (\%)$.

B. Określenie poszczególnych uchybów granicznych oraz granicznego uchybu zespolonego $\delta_n(\text{gr})$ pomiaru, spowodowanych narzedziami mierniczymi

Zgodnie z teorią pomiarów mocy czynnej w układach trójfazowych (przy stosowaniu przekładników) uchyb względny całkowity każdego systemu składa się z czterech części:

$$\delta \approx (\delta_u + \delta_J + \delta_w + \delta_\varphi)\% \quad (1)$$

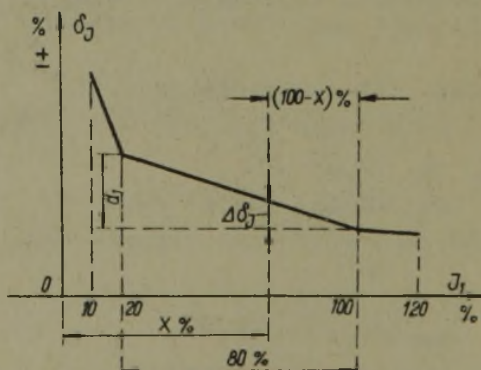
(oznaczenia jak wyżej)

Przy ustalaniu na podstawie tego wzoru uchybu granicznego całego układu należy brać pod uwagę uchyby graniczne wszystkich składowych, zakładając jednocześnie najmniej korzystną ich koincydencję, a więc jednokierunkowość (co jest zgodne z odpowiednimi normami, przewidującymi możliwość powstawania jednokierunkowych odchyłek, dodatnich lub ujemnych).

Ustalamy więc kolejne wartości graniczne tych składników, zgodnie z brzmieniem odpowiednich norm.

a) Uchyby graniczne (δ_J) określamy wykorzystując linie granic klasowych, tj. uważamy że są one wystarczające do nich zbliżone. Gdy obciążenie przekładników prądowych ($X = \frac{I}{I_n} \cdot 100\%$) jest niższe od 100% (I_n) to, zgodnie z przebiegiem prostej łączącej granice uchybów przy 100% i 20% obciążenia, obliczamy częściowy normatywny przyrost uchybu granicznego wg wzoru (rys. 3):

$$\Delta\delta_J = \frac{\text{przyrost } (d_1)}{80} (100 - X)\% \quad (2)$$



Rys. 3. Normatywne przyrosty granic uchybów prądowych ($\Delta\delta_{J\%}$)

Dla klas 0,5 i 0,2 otrzymamy kolejno:

$$\Delta d_J = \frac{(0.75 - 0.50)}{80} (100 - X)\% = 313 \cdot 10^{-5} (100 - X)\%$$

$$\Delta d_J = \frac{(0.30 - 0.20)}{80} (100 - X)\% = 125 \cdot 10^{-5} (100 - X)\%$$

(wartości normatywne uchybów $d_J\%$ należy brać z tab. II - dla 100% i 20% obciążenia przekładników).

Np. przy 50% obciążenia przekładnika kl. 0.5 otrzymamy przyrost: $\Delta d_J = 313 \cdot 10^{-5} \cdot (100 - X)\% = 0,15\%$ - co daje łącznie z tą korektą: $d_J = 0.50\% + 0.15\% = 0.65\%$. (normatywny uchyb 0.50% odpowiada 100% obciążeniu przekładnika).

b) Uchyby graniczne (d_u) odpowiadają niezmiennym normatywnym, ponieważ napięcie w okresie pomiarów wykazuje tylko nieznaczne wahania.

c) Uchyby graniczne watomierzy dla wychyleń (α_1 i α_2), zależnych od obciążenia i $\cos \varphi$, obliczamy wg wzoru:

$$d_w = \text{klasa} \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha} \% \quad (3)$$

gdzie:

α_n - zakres pomiarowy watomierzy.

d) Uchyby graniczne spowodowane współdziałaniem uchybów kątowych γ_J i γ_u ustalamy dla obydwu systemów w sposób następujący: za przypadek najbardziej niekorzystny przyjmujemy znaczne zbliżenie uchybu γ_J do granic normatywnych, natomiast oddziaływanie uchybu γ_u za możliwe do pominięcia (jak wykazują świadectwa odbiorów i sprawdzeń oraz dane z literatury wartości γ_u mogą przebiegać bardzo niskie znaczenia, wynoszące za ledwie kilka minut).

Toteż pomijamy jego wpływ, niezależnie od koincydencji w jakiej może on wystąpić w stosunku do γ_J , powodując jego nieznaczne zmniejszenie lub powiększenie. Wtedy w obu systemach będziemy mieli ten sam najbardziej niekorzystny uchyb graniczny katowy: $\gamma \approx \pm \gamma_J$ i w konsekwencji odnośnie graniczne uchyby pomiaru mocy w systemach w postaci: $d_\varphi = \pm 0,029 (\gamma_J) \cdot \text{tg}(30^\pm \varphi)\%$. Ponieważ pochyłość granic klasowych dla γ_J (zastępujących charakterystyki uchybów) wzrasta ze zmniejszeniem obciążenia prze-

kładników (X%), należy i tu stosować przy obliczeniach poprawkę na normatywny przyrost (rys. 4)

$$\Delta \gamma_J = \frac{\text{przyrost } (d'_2)}{80} (100 - X) \text{ min.} \quad (4)$$

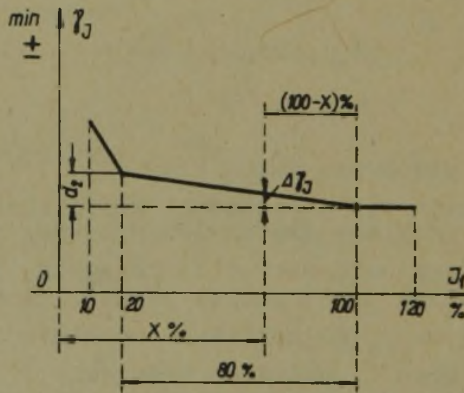
Dla klas 0,5 i 0,2 otrzymamy kolejno:

$$\Delta \gamma_J = \frac{(40' - 30')}{80} (100 - X) \text{ min} = 125 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - X) \text{ min},$$

$$\Delta \gamma_J = \frac{(15' - 10')}{80} (100 - X) \text{ min} = 62,5 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - X) \text{ min}.$$

(wartości normatywne uchybów w min. należy brać z tab. II dla 100% i 20% obciążenia przekładników).

Np. dla przekładnika kl. 0,5 i $X = 50\%$ mamy $\Delta \gamma_J = 125 \cdot 10^{-3} (100 - 50) \text{ min.} = 6 \text{ min.}$ oraz łącznie $\gamma_J = 30' + 6' = 36 \text{ min.}$



Rys. 4. Normatywne przyrosty granic uchybów katowych ($\Delta \gamma_{J \text{ min}}$)

e) Uchyb graniczny zespołowy ($\delta n(\text{gr})$).

Uchyb pomiaru mocy w układzie Arona (rys. 1) jest uchybem "średnim ważonym"

$$\delta n(\text{gr}) = \frac{\alpha_1 \sum \delta' + \alpha_2 \sum \delta''}{\alpha_1 + \alpha_2} \% \quad (5)$$

gdzie

α_1 i α_2 - wskazania watomierzy W_I i W_{II} dla pewnego I i $\cos \varphi$ a $\sum \delta$ - sumy poprzednio określonych granicznych uchybów składowych (podanych w %):

$$\delta_n(\text{gr}) = \frac{\alpha_1 (\delta'_u + \delta'_J + \delta'_w + \delta'_\varphi) + \alpha_2 (\delta''_u + \delta''_J + \delta''_w + \delta''_\varphi)}{\alpha_1 + \alpha_2} \%$$

przy czym: $\delta'_u = \delta''_u = \delta_u$ i $\delta'_J = \delta''_J$ (te same klasy przekładników w obu systemach). Segregujemy podany wyraz na odpowiednie grupy:

$$1) \frac{\alpha_1 (\delta_u + \delta_J) + \alpha_2 (\delta_w + \delta_J)}{\alpha_1 + \alpha_2} \% = \frac{\delta_u (\alpha_1 + \alpha_2) + \delta_J (\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_1 + \alpha_2} \% = (\delta_u + \delta_J) \%$$

$$2) \delta_w = \frac{\alpha_1 \cdot \delta'_w + \alpha_2 \cdot \delta''_w}{\alpha_1 + \alpha_2} \%. \text{ Podstawiając odnośne wartości } \delta'_w \text{ w } p.C$$

otrzymamy:

$$\delta_w = \frac{\alpha_1 \cdot \text{klasa} \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha_1} + \alpha_2 \cdot \text{klasa} \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha_2}}{\alpha_1 + \alpha_2} \% = \frac{\text{klasa} \cdot 2\alpha_n}{\alpha_1 + \alpha_2} \% \quad (6)$$

np. dla watomierzy kl. 0,2 - 150 dz. otrzymamy:

$$\delta_w = \frac{0,2 \cdot 2 \cdot 150}{\alpha_1 + \alpha_2} \% = \frac{60}{\alpha_1 + \alpha_2} \%,$$

jako uchyb graniczny "średni ważony" dla obu watomierzy, przy wychyleniach α_1 i α_2 .

$$3) \delta_\varphi = \frac{\alpha_1 \delta'_\varphi + \alpha_2 \delta''_\varphi}{\alpha_1 + \alpha_2} \%. \text{ Ponieważ w obu systemach występuje}$$

ten sam uchyb kątowy graniczny $\gamma = \gamma_J$ więc spowodowany tym uchyb graniczny zespołowy δ_φ dla całego układu może być wyrażony, zgodnie z teorią, (przy założeniu obciążenia równomiernego) przybliżonym wzorem: $\delta_\varphi = \pm 0,029 \cdot \gamma \cdot \text{tg} \varphi \%$. Wartości δ_φ % obliczone dla uchybów normatywnych (przy $J_n = 100\%$) przekładników prądowych klas: 1.0 (60 min), 0.5 (30 min) i 0.2 (10 min.) są podane w tab. I dla $\cos \varphi = 1.0 - 0.5$. Wracając np. do obliczonego w p. "d" uchybu granicznego kąтового (z poprawką)

$\gamma = 36$ min. otrzymany: przy $\cos \varphi = 0,8$ i $\gamma_J = 30$ min. (kl. 0,5)
 $\delta_\varphi = 0,654\%$ (z tab. I), a z uwzględnieniem obliczonej poprawki
 $\delta_\varphi = 0,654 \cdot \frac{36}{30} = 0,78\%$.

Tabela I

Wartość wyrazu: $\delta_\varphi = 0,029 (\gamma \text{ min}) \cdot \text{tg} \varphi\%$ dla normatywnych uchybów
 kątowych przekładników prądowych klas: $-1.0 \pm 0.5 \pm 0.2 \pm 0.1$ - przy
 $100-120\% J_n$ (wg PN/E-06500 wzg VDE-0414)

| Lp. | cos φ | tg φ | kl. 1.0 | kl. 0.5 | kl. 0.2 | kl. 0.1 | min. |
|-----|---------------|--------------|---------|---------|---------|---------|------|
| | | | 60° | 30° | 10° | 5° | |
| 1 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | % |
| 2 | 0,95 | 0.329 | 0.573 | 0.286 | 0.095 | 0.048 | " |
| 3 | 0,90 | 0.484 | 0.840 | 0.420 | 0.140 | 0.070 | " |
| 4 | 0.85 | 0.620 | 1.080 | 0.540 | 0.180 | 0.090 | " |
| 5 | 0.80 | 0.750 | 1.308 | 0.654 | 0.218 | 0.110 | " |
| 6 | 0.75 | 0.882 | 1.536 | 0.768 | 0.256 | 0.128 | " |
| 7 | 0.70 | 1.020 | 1.776 | 0.888 | 0.296 | 0.148 | " |
| 8 | 0.65 | 1,168 | 2.028 | 1.014 | 0.338 | 0.170 | " |
| 9 | 0.60 | 1.334 | 2.328 | 1.164 | 0.388 | 0.194 | " |
| 10 | 0.55 | 1.520 | 2.640 | 1.320 | 0.440 | 0.220 | " |
| 11 | 0.50 | 1.732 | 3.012 | 1.506 | 0.502 | 0.250 | " |

Tabela II

Zestawienie normatywnych uchybów prądowych ($\delta_J\%$) i kątowych
 (γ_J min) dla przekładników prądowych wg norm PN/E i VDE

| Kraj | Norma | Uchyby prądowe w % ($\pm \delta_J$) | | | | | Natężenie prądu w % od znamion | Uchyby kątowe w min. ($\pm \gamma_J$) | | | | |
|--------|-------|--|------|------|-----|---|--------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| | | K l a s y | | | | | | K l a s y | | | | |
| | | 1.0 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | | | | 1.0 | 0.5 | 0.2 | 0.1 |
| Polska | PN/E | 1.0 | 0.5 | 0.2 | - | % | 100-120 | 60 | 30 | 10 | - | min |
| | 06500 | 1.5 | 0.75 | 0.3 | - | " | 20 | 80 | 40 | 15 | - | " |
| Niemcy | VDE | 1.0 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | " | 100-120 | 60 | 30 | 10 | 5 | " |
| | 0414 | 1.5 | 0.75 | 0.35 | 0.2 | " | 20 | 80 | 40 | 15 | 8 | " |

Z powyższego wynika, że teoretyczny zespołowy uchyb graniczny pomiaru mocy całego układu, spowodowany wszystkimi narzędziami mierniczymi, $\delta n(\text{gr})\%$ wyraża się wzorem, jak w p.B (1):

$$\delta n(\text{gr}) = \pm (\delta_u + \delta_J + \delta_w + \delta_\varphi)\% \quad (7)$$

lecz tu w nawiasach występują zespolone uchyby składowe graniczne (obliczane w % od mocy mierzonej w podany poprzednio sposób) dla całego układu.

C. Analiza rozkładu zespołowych uchybów przypadkowych, przy założeniu wykonania licznych pomiarów, z każdorazowo innymi uchybami stosowanych narzędzi mierniczych, przy zachowaniu tych samych klas ich dokładności

O ile będziemy wielokrotnie powtarzać ten sam pomiar mocy stosując każdorazowo narzędzia miernicze tych samych klas, lecz o różnych charakterystykach uchybów, to powstające uchyby zespołowe będą nie systematycznymi, lecz losowymi (przypadkowymi). Zespołowe uchyby losowe narzędzi mierniczych w fazach R i T spowodują bowiem każdorazowo powstanie zmiennej losowej w postaci średniego ważonego uchybu pomiaru (δ_n) wg wzoru:

$$\delta_n = \frac{\alpha_1 \sum \delta' + \alpha_2 \sum \delta''}{\alpha_1 + \alpha_2} \% \quad (8)$$

(tu $\sum \delta' \sum \delta''$ - algebraiczne sumy uchybów losowych w fazach R i T, przy niezmiennych wartościach $(\alpha_1 + \alpha_2)$ dla danego obciążenia i $\cos \varphi$).

Normy, dotyczące przekładników i watomierzy, podają granice uchybów klasowych, lecz nie narzucają określonych postaci ich przebiegów.

Zgodnie z sensem tych norm, mogą one przedstawiać się w różny sposób, wykazując oczywiście przeważnie wartości korzystne, tj. odbiegające od wyznaczonych granic. Przy takim założeniu, możemy przyjąć, pragnąc otrzymać jak najbardziej ogólne ujęcie rozważanego zagadnienia, że zmienne składowe licznika we wzorze (8) mogą każdorazowo przybierać dowolne losowe wartości i znaki, może również występować ich dowolna kompensacja.

W ten sposób będziemy mieli do czynienia z dowolnie licznym zbiorem uchybów zespołowych (przy tych samych klasach przyrządów).

Dysponując np. tylko 10 przekładnikami prądowymi (2 charakterystyki), 10 napięciowymi (2 charakterystyki) i 10 watomierzami (jedna charakterystyka uchybów) - z różnymi charakterystykami uchybów, możemy otrzymać:

$$C_{10}^2 = \frac{10!}{2!(10-2)!} = 45 \text{ kombinacji}$$

dla każdego rodzaju narzędzi, a łącznie - $45.45.45 = 91125$ odmiennych wariantów wyników o różnych wartościach i znakach, obejmujących zbiorowe procesy losowego kojarzenia uchybów prawdziwych, napięciowych i kątowych (oraz watomierzy) wg wzoru (8). Średnia arytmetyczna z licznych wyników tego rodzaju pomiarów będzie bardzo zbliżona do "wartości oczekiwanej" ($\alpha_1 + \alpha_2$), określonej przez stosunek - moc zadana: stała pomiaru i koło niej jako "osi zerowej" zostaną scentralizowane losowe co do wartości i znaku uchyby zespołowe. Takie różnowartościowe warianty odchyłek można segregować na grupy, według zbliżonych wartości i znaków, tworząc tzw. histogramy wzg. poligony. Nader liczne zbiorowości takich losowych odchyłek będą przy tym kształtować się koło "osi zerowej" w postaci wystarczająco zbliżonej do rozkładów normalnych, zawierając w sobie i wynik zbliżony do konkretnie nas interesującego. Chodzi jednak o oszacowanie jego możliwej wartości ekstremalnej, zbliżonej do 3σ , jako praktycznej granicy możliwej, lecz nader rzadkiej, odchyłki od "osi zerowej" (σ - reprezentuje tu uchyb standardowy rozkładu).

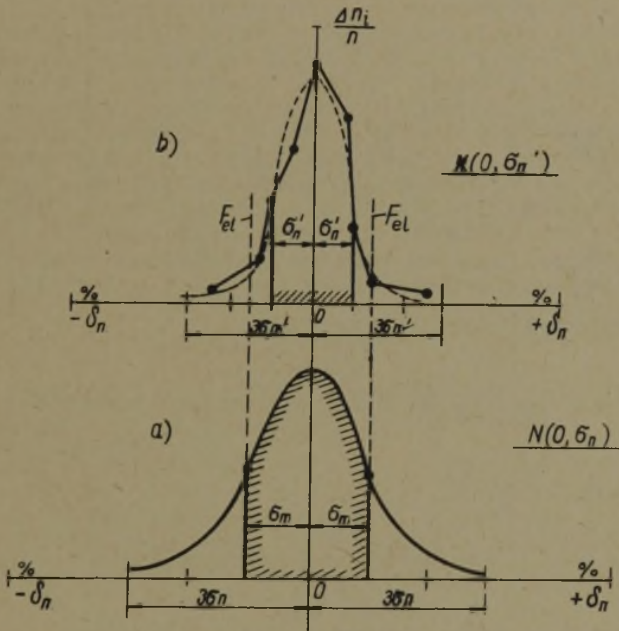
Rozważany rozkład uchybów, oznaczony symbolicznie $K(0, \sigma')$ jest praktycznie nieosiągalny, toteż nie możemy bezpośrednio ustalać wartości takich ekstremalnych odchyłek i musimy oceniać je w sposób pośredni. W omawianych rozkładach takie odchyłki w żadnym przypadku nie mogą osiągać wartości, wynikających ze wzoru (7), gdzie wartości składowe i ich koincydencje występują (teoretycznie) w postaci krańcowo niekorzystnej (w oparciu o granice normatywne poszczególnych uchybów). Zgodnie bowiem z rachunkiem prawdopodobieństwa, takie losowo skojarzone odchyłki są o wiele mniejsze. Gdybyśmy więc przyjmowali wartości δ_n (gr) wynikające z zestawień (7) jako "trzykrotnie" to otrzymane stąd wartości $\sigma_n = 1/3 \cdot \delta_n$ (gr) w odniesieniu do rozkładów rzeczywistych, będą odpowiadały nie odchyłkom średnim σ (68,3% prawdopodobieństwa nie przekroczenia), lecz znacznie większym, np. ca 2σ (95% prawdopodobieństwa), co dla potrzeb praktyki jest zupełnie wystarczające (porównawczo: współdziałanie "n" jednakowych granicznych uchybów losowych "a" w formowaniu losowego granicznego uchybu zbiorowego ocenia się jako $a\sqrt{n}$, a nie "an"). Na rys. 5 oznaczono symbolicznie: rozkład pomocniczy $N(0, \sigma_n)$, a rzeczywisty $K(0, \sigma'n)$.

D. Średni uchyb odczytów

Przy ocenie dokładności odczytów, związanych z rozważanymi pomiarami mocy i przeprowadzanych w różnych warunkach ruchowych przez różnych wykonawców, należy brać pod uwagę różne czynniki mające wpływ na dokładność odczytów, na przykład:

a) ew. niejednoczesność obu odczytów (α_1 i α_2) wykonywanych przez jedną lub dwie osoby (szczególnie przy niestabilnym obciążeniu generatora),

- b) odpowiednie ustawienie mierników i odpowiednie oświetlenie ich skal,
 c) szybkość wykonywania kompleksu odczytów (zwykle co 1-2 min),
 d) wahania wskazówek, utrudniające i opóźniające odczytywanie,
 e) zjawisko paralaksy, szczególnie przy szybkich odczytach,



Rys. 5

- a) pomocniczy rozkład normalny uchybów pomiarów $N(0, \sigma_n)$ oparty na obliczonej wartości wstępnej σ_n (gr) $\approx 3\sigma_n$, b) wyrównany rozkład uchybów $K(0, \sigma'_n)$ z histogramu (wzgl. poligonu) liczących pomiarów

- f) spostrzegawczość i stan wzroku wykonawców,
- g) cechy indywidualne (np. trafność oceny części działek),
- h) stan fizyczny i psychiczny (ew. przemęczenie, szczególnie przy pomiarach w nocy spowodowanych warunkami ruchu),
- 1) doświadczenie i staranność.

Należy tu zwrócić specjalną uwagę na ocenę dziesiątych części działek (szczególnie przy niestabilnym obciążeniu i szybkich odczytach).

Liczne doświadczenia w tym zakresie (nawet w warunkach laboratoryjnych) wykazały, że większość odczytujących wykazuje predykcję do określonych liczb, a najbardziej unika się podawania końcówek 0,1 lub 0,9. Przy niestabilnym obciążeniu pracującego na sieć generatora i innych niesprzyjających okolicznościach, uchyby poszczególnych odczytów mogą dochodzić do 0,3-0,5 działki i więcej. W takich przypadkach właściwym będzie wprowadzenie pojęcia "uchybu średniego" dla odczytu zespolonego ($\alpha_1 + \alpha_2$). Uchyby poszczególnych odczytów mogą przybierać różne wartości losowe, toteż i ich koincydencje mogą mieć różne wartości i znaki. Przyjmując, że warunki odczytów, towarzyszących omawianym wyżej pomiarom nie odbiegają zasadniczo od aktualnie istniejących i zakładając, że rozkład tych koincydencji jest zbliżony do normalnego $N(0, \sigma_0)$ oraz szacując orientacyjnie (odpowiednio do istniejących warunków), największy możliwy uchyb odczytów $\pm \Delta\alpha_{\max}$, a zespolowe $\pm 2\Delta\alpha_{\max}$ jako $-3\sigma_0$ (w przybliżeniu) otrzymamy:

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot \Delta\alpha_{\max} 100}{3(\alpha_1 + \alpha_2)} \% \text{ (średni uchyb odczytów)}$$

Np. przy $\Delta\alpha_{\max} = 0,5$ dz.

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 100}{3(\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{33}{\alpha_1 + \alpha_2} \%$$

Tak obliczone uchyby odczytów można traktować jako pewną korektę wartości $\sigma_n\%$, nieco rozszerzając granice możliwych uchybów (wzór (9) oraz przykłady 1 i 2).

E. Strefa rozrzutu wartości przypadkowego uchybu pomiaru. Odnośny wskaźnik "P el"

Zgodnie z przytoczonymi rozważaniami możliwy uchyb pomiaru, spowodowany narzędziami mierniczymi, może być ustalony w podany powyżej sposób, z dołączeniem średniego uchybu odczytów $-\sigma_0\%$ - na podstawie reguły sumowania wariancji niezależnych zmiennych losowych wg wzoru:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_0^2} \% \quad (9)$$

($\sigma_n\% \approx 1/3 \delta n(\text{gr})$ - z rozkładu normalnego pomocniczego).

Biorąc pod uwagę, że obecne konstrukcje przekładników i watomierzy ograniczają możliwość występowania zbyt niekorzystnych koincydencji ich uchybów przy rozważanych pomiarach mocy, można uważać obliczoną podaną metodą wartości σ_n % (wzg... σ_m) za miarodajny wskaźnik zakresu przypadkowego uchybu pomiaru (tj. strefy możliwego jego rozrzutu) i w takim sensie oznaczać go symbolem "F el". Wynik pomiaru przybierze wtedy postać:

$$P = P_p (1 \pm F_{el}\%) \quad (10)$$

gdzie P_p - moc czynna pomierzona, a P - granice w jakich ona się mieści.

Łącząc prawdopodobne uchyby powiązanych ze sobą pomiarów 1) cieplnego $-F_c$ % (w % od pomierzonej godzinowej ilości ciepła kcal/h zużytego przez turbinę) i 2) elektrycznego $-F_{el}$ % (w % od jednocześnie pomierzonej mocy elektrycznej -kW) wg reguły łączenia niezależnych zmiennych losowych, określimy zakres prawdopodobnego uchybu pomiaru jednostkowego zużycia ciepła przez badany turbozespół (tz):

$$F_{tz} = \pm \sqrt{F_c^2 + F_{el}^2} \% \quad (11)$$

(patrz np. normę polską - $\frac{PN - 61}{M - 35520}$ "Turbiny parowe" (1.8.62).

F. Analiza innej metody określania prawdopodobnego uchybu pomiaru mocy generatorów

Celem zoharakteryzowania trudności rozwiązania omawianego zagadnienia rozpatrujemy i inny sposób rozumowania, oparty również o rachunek prawdopodobieństwa. Tok obliczeń rozpoczyna ustalanie prawdopodobnych uchybów względnych dla każdego systemu z osobna wg wzorów

$$f_1 = \sqrt{\delta_u^2 + \delta_J^2 + \delta_w^2 + \delta_v^2 + \delta_{O_1}^2} \% \quad (\text{faza T})$$

$$f_2 = \sqrt{\delta_u^2 + \delta_J^2 + \delta_w^2 + \delta_v^2 + \delta_{O_2}^2} \% \quad (\text{faza R})$$

(oznaczenia jak poprzednio, σ_{O_1} i σ_{O_2} dotyczą uchybów względnie odczytów w %). Przy tego rodzaju obliczeniach należy pod pierwiastkiem umieszczać (zgodnie z teorią) uchyby jednego rodzaju, np. graniczne albo średnie, w zależności od tego jaki prawdopodobny uchyb chcemy określić (lecz nie dowolnie dobrane). Pierwsze trzy wartości ($\delta_u, \delta_J, \delta_w$) są ustalane zgodnie z

poprzednimi wyjaśnieniami (p.B) wg odnośnych norm, przy czym uchyby graniczne - δ_w są obliczane z osobna dla obu faz, zgodnie z aktualnymi wychyleniami watomierzy (α_1 i α_2) p.B-wzór 3. Natomiast uchyb kątowy (obliczany wg wzoru:

$$\delta_\varphi = \pm 0,029 (\gamma_J - \gamma_U) \operatorname{tg}(30 \pm \varphi),$$

również z osobną dla obu faz) jest bezpodstawnie pomniejszany przez podawanie wartości $(\gamma_J - \gamma_U)$ min jako różnicy normatywnych uchybów kątowych. Te nieznaczne różnice będą (w zależności od doboru klas) wzrastały przy $\gamma_J > \gamma_U$ lub malały przy $\gamma_J < \gamma_U$ - ze spadkiem obciążenia, a przy $\gamma_J = \gamma_U$ (np. kl. 0,2) ten podstawowy uchyb pomiaru w ogóle znika lub przybiera minimalne wartości. Takie ujęcie sprawy nie znajduje uzasadnienia. Uchyby odczytów są tu zawsze obliczane przy założeniu tradycyjnej odchyłki 0,1 dz., niezależnie od warunków pomiaru. W końcowej fazie omawianych obliczeń zespołowy uchyb graniczny układu ustala się wg wzoru:

$$F = \frac{\sqrt{(\alpha_1 \cdot f_1)^2 + (\alpha_2 \cdot f_2)^2}}{\alpha_1 + \alpha_2} \%$$

Tu należy zwrócić uwagę, że:

1) W przytoczonych powyżej obliczeniach względne uchyby graniczne fazowe (f_1 i f_2) są ze sobą ściśle powiązane, co wynika ze sposobu ustalania jednoimiennych wartości podpierwiastkowych.

2) Przy metodzie Arona wskazania watomierzy (α_1 i α_2) są zawsze od siebie zależne, dla każdego $\cos\varphi$ (przy ustalonym równomiernym obciążeniu faz).

Z tych względów graniczne uchyby fazowe bezwzględne $\alpha_1 \cdot f_1$ i $\alpha_2 \cdot f_2$ nie mogą być traktowane jako wielkości niezależne i łączone bezpośrednio w podany sposób.

Potwierdza to np. wykonane wg podanych reguł obliczenie przy $\cos\varphi = 0,5$ ($\alpha_2 = 0$). Otrzymamy wtedy: $\delta_w = \frac{\text{const.}}{\alpha_2} = \infty$, a poza tym $\delta_{0..} = \frac{\text{const}}{\alpha_2} = \infty$, co powoduje że i $f_2 = \infty$, a w konsekwencji:

$$F = \frac{\sqrt{(\alpha_1 \cdot f_1)^2 + (0 \cdot \infty)^2}}{\alpha_1 + 0} = ?$$

G. Uzasadnienie potrzeby przybliżonej oceny dokładności pomiaru mocy w warunkach ruchowych

W literaturze specjalistycznej spotyka się artykuły omawiające sposoby ustalania uchybu pomiaru pośredniego mocy w układzie Arona. Wszystkie one opierają się o wykorzystywanie odpowiednio sporządzonych charakterystyk uchybów przekładników i watomierzy. Takie ujęcie sprawy nie wydaje się jednak zbyt uzasadnionym, gdy chodzi o pomiar mocy generatorów w warunkach ruchowych.

W praktyce pomiarowej bowiem (pomiaru eksploatacyjne i gwarancyjne) przeważnie nie dysponujemy takimi charakterystykami (wzgl. są one sporządzone dla nieodpowiednich VA i $\cos\varphi$ w obwodach wtórnych). Toteż nie korzystamy z ew. wykresów uchybów watomierzy, traktując je jedynie jako gwarancję zachowania dokładności klas, podobnie jak i w stosunku do przekładników (najczęściej spotykamy przekładniki kl. 0,5, a watomierze kl. 0.2). Powyższa typowa sytuacja wynika z następujących przyczyn:

- 1) nie istnieje obowiązek legalizacji przekładników nie przeznaczonych do rozliczeń,
- 2) zdejmowanie charakterystyk przekładników w warunkach ruchowych jest pracochłonne i kosztowne (postoje),
- 3) istnieją poza tym trudności w dokładnym ustaleniu obciążenia obwodów wtórnych (z dołączonymi miernikami kontrolnymi) -VA i $\cos\varphi$.
- 4) w czasie pomiarów ustalone VA mogą ulec zmianie,
- 5) instalowanie obcych wycechowanych przekładników w praktyce przeważnie nie jest stosowane (brak miejsca, pracochłonność, przerwy w ruchu),
- 6) dla ustalenia wypadkowych uchybów należy na ogół dysponować dziesięciu charakterystykami: przekładniki prądowe 2x2, napięciowe - 2x2, watomierze 2 (stosuje się z reguły przekładniki tych samych klas, w fazach R i T - lecz uchyby ich nie muszą być jednakowe),
- 7) należy liczyć się z możliwością powstania szeregu uchybów "pozaklasowych" (dodatkowych), spowodowanych przeważnie warunkami ruchu (czynniki zewnętrzne, przeważnie nieuchwytnie), jak na przykład:
 - a) wpływ obcych pól magnetycznych na watomierze elektrodynamiczne (mogą być nieekranowane wzgl. nieastatyczne),
 - b) ew. uchyby temperaturowe ($t > 20^{\circ}\text{C}$),
 - c) wzrost uchybów δ_u i γ_u na skutek nieodpowiedniego przekroju długich przewodów wtórnych obwodów napięciowych. Podobnie od oporności źle dobranych bezpieczników w tych obwodach,

- d) wpływ pól magnetycznych zbyt blisko ułożonych szyn na stan magnetyczny rdzeni przekładników szynowych,
 e) niestaranna korekcja położenia zerowego wskazówek watomierzy.

H. Uwagi końcowe

Trudności powiązane ze sporządzeniem odpowiednich, dostosowanych do aktualnych warunków pomiarów, charakterystyk uchybów narzędzi mierniczych oraz z ich wykorzystywaniem uzasadniają zdaniem autora oelowość prób ustalenia metody oceny prawdopodobnego uchybu przy ruchowych pomiarach mocy generatorów.

Brak konkretnych opracowań w tym kierunku może za wyjątkiem niepublikowanych instrukcji wewnętrzno-zakładowych, pozwala przypuszczać że, poruszony w ujęciu dyskusyjnym, temat może zainteresować szerszy ogół elektryków.

Przykłady obliczeń

1. Pomiar mocy turbogenerators. Dane znamionowe: moc 50.000 kVA napięcie $U_n = 10000 \pm 5\% \text{ V}$, prąd $J_n = 2750 \text{ A}$.

Przekładniki kl. 0,5, watomierze kl. 0,2-150 dz. Przekładnie: napięciowe $10000/100 = 100$, prądowe $3000/5 = 600$. Stałe watomierzy 5W/dz. Stała pomiaru: $\frac{100 \cdot 600 \cdot 5}{1000} = 300 \text{ kW/dz}$. Prąd pomierzony (średnio 2450 A). Stopień obciążenia przekładników prądowych: $X = \frac{2450 \cdot 100}{3000} = 82\%$. Wskazania watomierzy (średnie z 2x20 odczytów): Faza T- $\alpha_1 = 81,7 \text{ dz}$. Faza R- $\alpha_2 = 32,6 \text{ dz}$. Łącznie $(\alpha_1 + \alpha_2) = 114,3 \text{ dz}$. Cos φ (z nomogramu) $\approx 0,8$. Moc z odczytów - $P_p = 114,3 \cdot 300 \text{ kW/dz} = 34300 \text{ kW}$.

Obliczenia wstępne: uchyby graniczne 1) watomierzy - $d_w = 60/114,3 = 0,53\%$ (wzór 6) 2) przekładników prądowych (z poprawkami spowodowanymi niepełnym ich obciążeniem - X = 82% rys. 3 i 4).

$$\Delta d_J = 313 \cdot 10^{-5} (100 - X) = 313 \cdot 10^{-5} (100 - 82) = 0,057\%$$

$$\Delta \gamma_J = 125 \cdot 10^{-3} (100 - X) = 125 \cdot 10^{-3} (100 - 82) = 2,3 \text{ min.}$$

Stąd: $d_J = 0,5 + 0,057 = 0,56\%$ oraz $\gamma_J = 30 + 2,3 = 32 \text{ min.}$

Z tabeli I dla cos $\varphi = 0,8$ (przekładniki kl. 0,5 - $\gamma = 30 \text{ min}$) mamy: $d_\varphi = 0,654\%$ - a z poprawką kątową - $d_\varphi = \frac{0,654 \cdot 32}{30} = 0,70\%$.

Uchyb teoretyczny zespołowy (w % od mocy mierzonej):

$$d_{n(\text{gr})} = d_u + d_J + d_w + d_\varphi = 0,50 + 0,56 + 0,53 + 0,70 = 2,30\%$$

Stąd: $\sigma_n = 2,30/3 = 0,76\%$. Odczyty (przyjmując $\Delta\alpha_{\max} = \pm 0,3$ dz)

$$\sigma_o = \frac{2,0,3 \cdot 100}{3 \cdot 114,3} = 0,175\%$$

Zakres prawdopodobnego uchybu pomiaru wynosi:

$$F_{el} = \sqrt{0,76^2 + 0,175^2} \approx 0,78\%$$

Wynik pomiaru mocy: $P = 34,3$ ($1 \pm 0,78\%$) MW.

Przyjmując $\Delta\alpha_{\max} = 0,5$ dz. (gorsze warunki odczytów) otrzymamy:

$$\sigma_o = \frac{33}{114,3} = 0,29\% \quad i \quad F_{el} = \sqrt{0,78^2 + 0,29^2} = 0,82\%$$

2. Te same dane wyjściowe, lecz przekładniki kl.0,2. Uchyby graniczne watomierzy bez zmiany (kl. 0,2), zmniejszą się natomiast uchyby związane z przekładnikami: napięciowy δ_u , prądowy

δ_j i kątowy - δ_φ . Poprawki dla przekładników prądowych:

$$\Delta\delta_j = 125 \cdot 10^{-5} (100-X) = 125 \cdot 10^{-5} (100-82) = 0,023\%$$

$$\Delta\delta_j = 62,5 \cdot 10^{-3} (100-X) = 62,5 \cdot 10^{-3} (100-82) \approx 1 \text{ min (pomijamy)}$$

Dla $\cos \varphi = 0,8$ i $\gamma = 10$ min (przekł. kl. 0,2) mamy z tabeli I $\delta_\varphi = 0,218$. Sumujemy uchyby graniczne:

$$\delta_{n(gr)} = 0,2 + 0,223 + 0,53 + 0,218 = 1,17\%$$

Obliczamy: $\sigma_n = 1,17/3 = 0,40\%$ i $\sigma_o = 0,175\%$ (jak poprzednio)

Zakres prawdopodobnego uchybu pomiaru (przekładniki kl.0,2)

$$F_{el} = \sqrt{0,40^2 + 0,175^2} \approx 0,45\%$$

A więc dokładność pomiaru wzrosła. Przyjmując i tu gorsze warunki odczytów ($\Delta\alpha_{\max} = 0,5$ dz) otrzymamy:

$$F_{el} = \sqrt{0,40^2 + 0,29^2} = 0,50\%$$

Rękopis złożono w Redakcji w lipcu 1965 r.

LITERATURA

- [1] Prytkow W., Talickij A.: Kurs elektryczeskich izmierenij 1960.
- [2] Skirl W.: Elektrische Messungen 1936.
- [3] Minin G.: Eksploatacja elektroizmieritelnych priborow 1959.
- [4] Wentzel W.: Teorija wierojatnostiej 1964.
- [5] Röntsch K.: Genauigkeit von Messung und Messgerät 1950.

МЕТОД ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ВАТТМЕТРОВ

Резюме

В статье представлен метод приближенной оценки точности измерения мощности на зажимах трехфазных генераторов высокого напряжения, в производственных условиях, при приемосдаточных и эксплуатационных испытаниях турбоагрегатов.

ACCURACY OF MEASUREMENT METHODS OF THE ACTIVE POWER OF GENERATORS

Summary

Description of the method of the approximate evaluation of the power measurement accuracy on the threephase generator clamps (high voltage) in running conditions.

