ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 22 ELEKTRYKA Z.6 1960

ANDRZEJ ŻELEŃSKI

Katedra Elektrowni Politechniki Śląskiej

WPŁYW GRUPOWEGO WYBIEGU SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH NA SAMOROZRUCH PRZY SZR

/Autoreferat pracy doktorskiej złożonej na Wydziele Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Termin obrony: 30.I.59 r.- Rękopis dostarczono 25.VI.1959 r./

S t r e s z c z e n i e. Artykuł zawiera podane w streszczeniu wyniki badań /10/ dotyczących wzajemnego wpływu elektrycznie połączonych silników w czasie ich wybiegu grupowego przy samoczynnym załączaniu rezerw w elektrowniach i innych zakładach przemysłowych oraz wynikające stąd wnioski dotyczące projektowania układów i automatyki SZR.

Wstęp

Wprowadzona obecnie w elektrowniach automatyka SZR /samoczynne załączanie rezerw/ wymaga przy projektowaniu dokonania analizy warunków samorozruchu silników, która może mieć poważny wpływ na kształtowanie schematu elektrycznego i dobór napędów potrzeb własnych. Analiza ta ma szczególne znaczenie przy projektowaniu SZR-u w istniejących elektrowniach, a zwłaszcza w zakładach przemysłowych o dużej różnorodności napędów i mechanizmów napędzanych. Obliczenia opierają się wtedy na pomiarach wykonywanych indywidualnie dla poszczególnych agregatów. Metody pomiarów i obliczeń opracowane zostały i opublikowane w r. 1955 /3/. Metody te, w miarę zbierania materiałów statystycznych i doświadczeń eksploatacyjnych, były stopniowo w latach 1955-1958 upraszczane i udoskonalane. Korzystając z zebranych doświadczeń można obecnie ograniczać pomiary do minimum.

Wspomniane wyżej metody pomiarów i obliczeń nie uwzględniają jednak okoliczności, że w czasie SZR-u napędy wyłączane są zwykle grupami, w których silniki pozostają wzajemnie połączone bądź to bezpośrednio, bądź przez transformator. W tych warunkach napięcia resztkowe pojawiające się na silnikach po ich wyłączeniu powodują prądy wyrównawcze, które nie pozostają bez wpływu na krzywe wybiegów, a tym samym i na warunki samorozruchu. W literaturze technicznej spotkać można na ten temat ogólne wypowiedzi /1/, /4/, brak jest jednak ujęcia umożliwiającego liczbowe ujęcie skutków wspomnianego zjawiska. Panuje pogląd, że wzajemny wpływ silników stawia pod znakiem zapytania wyniki pomiarów indywidualnych. Skomplikowane przebiegi zachodzące w czasie wybiegu elektrycznie połączonych silników uniemożliwiają bezpośrednią ocenę tego wpływu. Dlatego problem ten rozważono bliżej analitycznie, a dla sprawdzenia słuszności analizy teoretycznej przeprowadzono szereg pomiarów laboratoryjnych i w terenie. Krótki zarys tych badań oraz wyniki i wnioski stanowią treść niniejszego artykułu.

Pierwsza część pracy zawiera analizę teoretyczną zjawisk przy grupowym wybiegu elektrycznie połączonych silników. W analizie tej rozpatrzony jest najpierw układ dwusilnikowy z uwzględnieniem momentów asynchronicznych związanych z wzajemnym poślizgiem wybiegających silników. W oparciu o szereg założeń upraszczających wyprowadzone zostają wzory na poprawki do obliczeń wykonywanych dla poszczególnych silników indywidualnie. Wzory te rozszerzone są dalej dla układu wielosilnikowego. Dodatkowy wpływ momentów synchronicznych zanalizowany jest oddzielnie. Wszystkie rozważania dotyczą silników asynchronicznych, które obecnie prawie wyłącznie wchodzą w grę przy wprowadzaniu SZR-u.

W części drugiej przeprowadzona jest analiza wpływu parametrów wyjściowych układu na rozpatrywane przebiegi. Rozważono tu wpływ parametrów znamionowych poszczególnych agregatów, ich ilości i obciążenia. Analiza ta ma na celu wykazanie, w jakich warunkach spodziewać się należy największego wzajemnego wpływu silników, względnie kiedy można go pomijać. W efekcie analiza doprowadza do uproszczenia wzorów i umożliwia ujęcie ich w postaci graficznej.

Część trzecia zawiera wyniki pomiarów laboratoryjnych i przemysłowych, przeprowadzonych dla sprawdzenia wyni-

ków teoretycznych oraz przykłady obliczeniowe. Oddzielnie potraktowane zostały w tej części obliczenia dla układów elektrownianych, które prowadzą do pewnych wniosków dotyczących wyłącznie elektrowni.

W części czwartej podane są ogólne wnioski wynikające z całej pracy.

Pomiary laboratoryjne przeprowadzone zostały przez autora w Laboratorium Katedry Elektrowni Politechniki Śląskiej, pomiary przemysłowe - w kilku elektrowniach i innych zakładach przemysłowych /w ramach pracy autora w Zakładzie Badań i Pomiarów "Energopomiar"/.

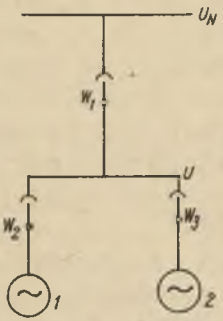
1. Analiza teoretyczna zjawisk przy grupowym wybiegu silników

Jako podstawę do rozważań przyjęto układ 2 silników pokazany na rys.1. Dla obydwóch silników spełnione musi być w każdej chwili równanie wynikające z warunków równowagi wirników

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_o \qquad /1/^{x/}$$

gdzie

- J - moment bezwładności mas wirujących,
- ω - prędkość kątowa wirnika,
- M_e - elektryczny moment obrotowy,
- M_o - całkowity moment oporu /równy sumie momentu oporu mechanizmu napędzanego oraz momentu tarcia i wentylacji silnika/.



Rys.1. Układ dwusilnikowy

x/ Numeracja wzorów według pracy doktorskiej [10].

Dla danych rozważań interesujące są trzy przypadki, które zachodzić mogą w rozpatrywanym układzie:

a/ obydwa silniki są załączone i pracują w stanie ustalonym, wtedy

$$M_e = M_o = \text{const.}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_o = 0$$

b/ silniki odbywają wybieg indywidualny, wtedy

$$M_e = 0$$

$$M_o \neq 0$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = - M_o$$

przy czym M_o jest na ogół zmienne,

c/ silniki odbywają wybieg grupowy, wtedy

$$M_e = M_d$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_o$$

W ostatnim przypadku moment elektryczny M_e powstaje w związku z przepływem prądów wyrównawczych, spowodowanych napięciami resztkowymi silników. Moment ten, nazywamy momentem "dodatkowym" /M_d/, powoduje pewne dodatkowe przyspieszenie lub opóźnienie wybiegu. Wyznaczenie przebiegu tego momentu daje możność uwzględnienia wzajemnego wpływu silników w czasie SZR grupowego. Wymaga to jednak rozważenia zjawisk zachodzących w silniku o zmiennym obciążeniu, przy zasilaniu go napięciem o zmiennej amplitudzie i częstotliwości.

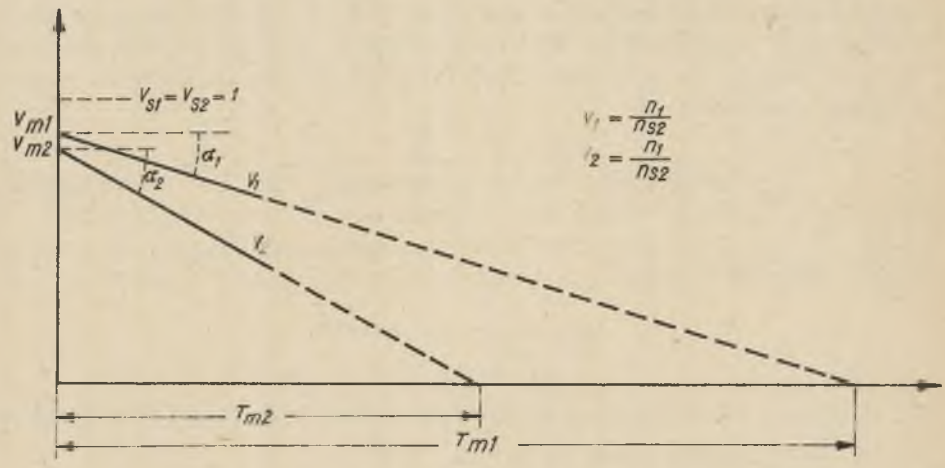
Przebieg $M_d = f/t/$ wyznaczyć można przez pomiar wzajemnej wymiany mocy w czasie wybiegu obydwóch silników. Wymaga to jednak kosztownych i trudnych ruchowo pomiarów, które trzebaby powtarzać dla każdego przypadku. Metodę tę traktować by można tylko jako sposób umożliwiający sprawdzenie słuszności innej metody prostszej.

W omawianej pracy rozpatrzono zagadnienie teoretycznie i wyprowadzono wzory umożliwiające wyznaczenie szukanych przebiegów w prosty sposób obliczeniowy lub graficzny.

Moment dodatkowy stanowi sumę momentów synchronicznych i asynchronicznych, które można rozpatrywać oddzielnie. Jak wspomniano we wstępie, pierwsze rozważania uwzględniają wyłącznie wpływ momentów asynchronicznych, które odgrywają tu główną rolę.

W rozważaniach tych oparto się na szeregu założeń upraszczających, bez których zagadnienie jest praktycznie nierozwiązalne. Uproszczenia te jednak przyjmowano w taki sposób, ażeby wpływały raczej na powiększenie wyników, które pozostają tym samym bezpieczne.

Zasadniczym założeniem upraszczającym jest przyjęcie, że indywidualne wybiegi silników są prostoliniowe /rys.2/.



Rys.2. Wybiegi dwóch silników

Przebiegi tego rodzaju, charakterystyczne dla mechanizmów o stałym momencie obciążenia, przyjąć można i w innych przypadkach biorąc pod uwagę krótki czas wybiegu w czasie SZR /zwykle w granicach 0,7 ... 1,5 s/. Czas, w którym wzajemne oddziaływanie silników może mieć praktyczne znaczenie, jest przeważnie jeszcze znacznie krótszy, co potwierdziły oscylogramy SZR kilkudziesięciu różnych napędów.

Następnym założeniem jest przyjęcie prostoliniowej zależności momentów asynchronicznych od poślizgu, co jest w przybliżeniu słuszne dla obciążeń nie przekraczających wartości znamionowych. Poza tym przyjęto kwadratową zależność momentów asynchronicznych od napięcia, co spełnia się z wystarczającą dokładnością przy niezbyt dużych spadkach napięcia, a więc wtedy, kiedy wzajemny wpływ silników może mieć jeszcze jakiekolwiek praktyczne znaczenie.

Założono również, że strumienie magnetyczne wyłączonych silników zanikają wg krzywych wykładniczych o równych stałych czasowych. W przypadku znacznych różnic pomiędzy stałymi poszczególnymi silników można przyjmować dla bezpieczeństwa większą lub obliczyć wartość zastępczej stałej wg wzoru wyprowadzonego dalej.

Przy tych założeniach, stosując również pewne matematyczne przybliżenia przy rozwiązywaniu równań różniczkowych, wyprowadzono wzór na przebieg momentu dodatkowego silnika 1 w układzie dwusilnikowym, który po rozszerzeniu go dalej do układu wielosilnikowego, przybrał następującą postać

$$m_{d1} = C_8 \left/ e^{-\frac{t}{T'}} - e^{-\frac{t}{T''}} \right/ + C_{12}\, e^{-\frac{t}{T''}} \qquad /147/$$

gdzie wartości:

$$C_8,\ C_{12},\ T' \text{ i } T''$$

są stałymi zależnymi od następujących parametrów układu:

P_N - moc znamionowa silnika /kW/,
S_N - poślizg znamionowy silnika,
P_m - względne obciążenie silnika /w odniesieniu do obciążenia znamionowego silnika/,
l - ilość silników w grupie,
η_N - znamionowa sprawność silnika,
$k = \frac{GD^2\, n_s^2}{P_N}$ - współczynnik charakterystyczny dla danego napędu,
GD^2 - moment zamachowy agregatu m^2 kG,
n_s - synchroniczna prędkość obrotowa silnika obr/min,
T^s - stała czasowa zanikania pola magnetycznego silników [5], przy czym

$$C_8 = \frac{\frac{p'_{m2}}{p'_{m1}} - \frac{k_2}{k_1}}{\frac{l_1 P_{N1}}{l_2 P_{N2}} \eta_N^2 + \frac{k_2}{k_1}} \qquad /101/$$

$$C_{12} = \left[\frac{p'_{m2}\ S_{N2}}{p'_{m1}\ S_{N1}} - 1\right]\left[\frac{l_2\ P_{N2}}{l_1\ P_{N1}} \cdot \frac{S_{N1}}{S_{N2}\ \eta_N^2} + 1\right] \qquad /108/$$

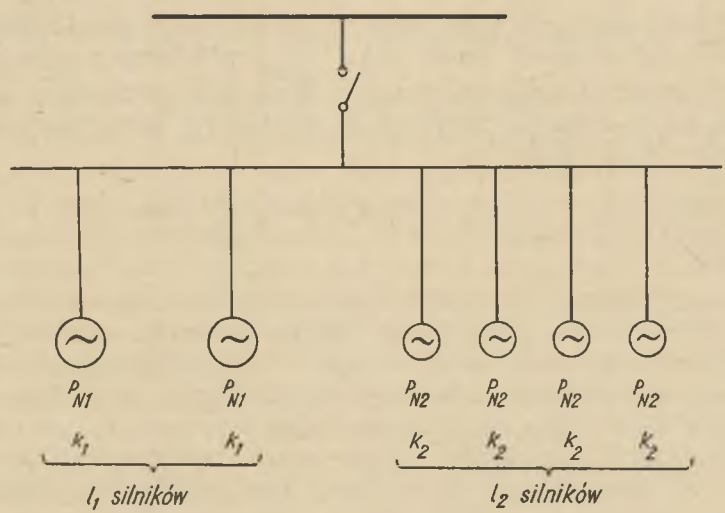
$$T' = \frac{T}{2} \qquad /59/$$

$$T'' = \frac{T}{2 + T\ C_{10}} \qquad /60/$$

$$C_{10} = \frac{369.10^3}{k_1\ S_{N1}}\left[\frac{l_1\ P_{N1}}{l_2\ P_{N2}} \cdot \frac{k_1}{k_2}\eta_N^2 + 1\right]\left[\frac{l_1\ P_{N2}}{l_1\ P_{N1}} \cdot \frac{S_{N1}}{S_{N2} \cdot \eta_N^2} + 1\right] \qquad /11/$$

/indeksy "1" i "2" oznaczają grupę silników/.

Powyższe wzory dotyczą pewnego szczególnego przypadku układu wielosilnikowego, przedstawionego na rys.3. Układ ten składa się z 2 grup silników o równych mocach P_N



Rys.3. Schemat układu wielosilnikowego /przyp. szczególny/

i równych współczynnikach k w każdej grupie. Prędkości obrotowe poszczególnych silników mogą być różne, ilość silników w każdej grupie dowolna. Opracowano również [10] przybliżony sposób, /który się tu pomija/ sprowadzenia dowolnego układu wielosilnikowego do przedstawionego powyżej.

Znając wzór na przebieg m_{d1} wyprowadzono również równanie krzywej grupowego wybiegu /którą tu pomijam/ oraz wzór na różnicę pomiędzy względnymi prędkościami obrotowymi w dowolnej chwili czasowej pomiędzy krzywą wybiegu indywidualnego i grupowego

$$\Delta v_1 = 364 \cdot 10^3 \frac{p'_{m1}}{k_1}\left[T' C_8\left(1-e^{-\frac{t}{T'}}\right)-T''\left(C_{12}-C_8\right)\left(1-e^{-\frac{t}{T''}}\right)\right] \quad /68/$$

Ze wzoru tego wynika, że Δv_1 rośnie od zera do pewnej ustalonej wartości. Wykazano teoretycznie i sprawdzono pomiarami, że ustalenie się Δv_1 następuje praktycznie najdalej po czasie $t = 0{,}5$ s od chwili wyłączenia silników. Czas przerwy beznapięciowej jest z reguły znacznie większy, praktycznie interesuje nas więc wartość maksymalna

$$\Delta v_{1\,max} = 364 \cdot 10^3 \frac{p'_{m1}}{k_1}\left[C_8\left(T'-T''\right) + C_{12}\, T''\right]$$

Wyprowadzono również wzór pozwalający projektantom SZR obliczyć wprost czas $\Delta t_{1\,max}$, o który powinna być krótsza przerwa beznapięciowa przy SZR grupowym przy założeniu tego samego nagrzania w czasie samorozruchu co przy SZR indywidualnym

$$\Delta t_{1\,max} = C_8\left(T' - T''\right) + C_{12}\, T'' \quad /173/$$

Wzory powyższe uwzględniają wyłącznie wpływ momentu asynchronicznego. Dodatkowy wpływ momentu synchronicznego zanalizowano oddzielnie. Do rozważań przyjęto /podobnie jak poprzednio/ układ wielosilnikowy przedstawiony na rys.3. Założono sprawność silników $\eta = 1$, co stanowi najostrzejszy przypadek oraz równe reaktancje przejściowe x' wszystkich silników. Pomimo tego uproszczenia otrzymano równania różniczkowe, których ścisłe rozwiąza-

nie przy pomocy funkcji elementarnych okazało się niemożliwe. Równania te rozwiązano w sposób przybliżony, przy czym przy całkowaniu uwzględniono wpływ dodatkowego momentu tylko do chwili wypadnięcia silników z synchronizmu, wykazano bowiem, że średnia wartość momentu synchronicznego dalszego przebiegu, który ma charakter oscylacyjny, jest w przybliżeniu równa zeru. Przy takich założeniach wyprowadzono wzór na przebieg dodatkowego momentu synchronicznego m_{dls} /który tu nie będzie przytaczany/ oraz wzór na dodatkowy wpływ tego momentu na przebiegi w czasie SZR, tj. wzór na czas Δt_{1s} /mający analogiczne znaczenie jak poprzednio wyprowadzone Δt_1 dla momentu asynchronicznego/

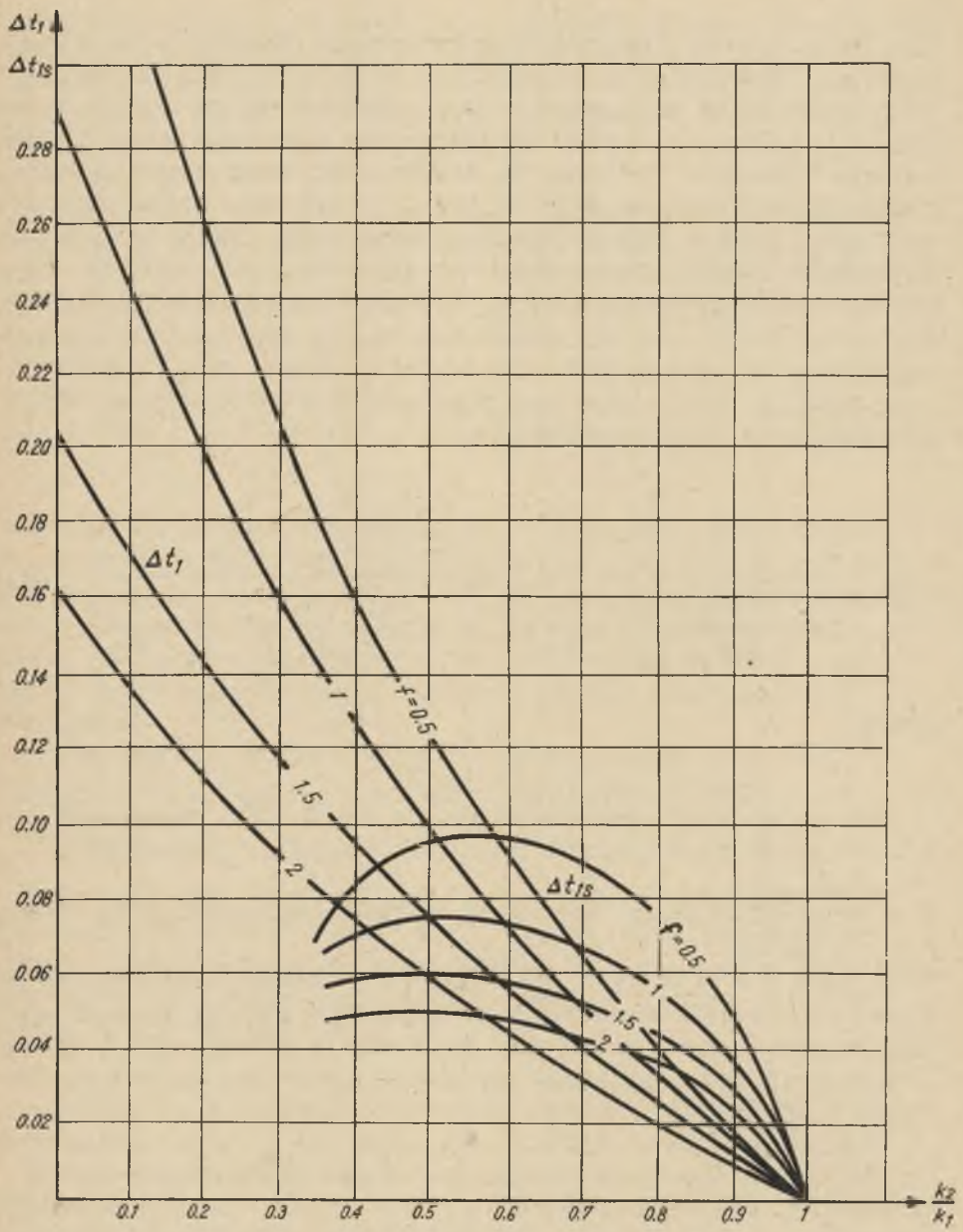
$$\Delta t_{1s} = T \frac{1 - \frac{k_1}{k_2}}{\frac{{}_1P_{N1}p'_{m1}}{{}_2P_{N2}p'_{m2}} + \frac{k_2}{k_1}} \cdot \lg \frac{\frac{{}_1P_{N1}p'_{m1}}{{}_2P_{N2}p'_{m2}} + \frac{k_2}{k_1}}{x'\left(\frac{{}_1P_{N1}p'_{m1}}{{}_2P_{N2}p'_{m2}}+1\right)\left(1 - \frac{k_2}{k_1}\right)} \qquad /144/$$

gdzie

x' - reaktancja przejściowa silników /pozostałe oznaczenia jak poprzednio/.

Na podstawie powyższego wzoru obliczono czasy Δt_{1s} dla różnych praktycznie mogących wystąpić parametrów $f = \frac{{}_1P_{N1}p'_{m1}}{{}_2P_{N2}p'_{m2}}$ oraz $\frac{k_2}{k_1}$ przy założeniu średnich wartości $T' = 0{,}25$ s i $x' = x'_1 = x'_2 = 0{,}6$ /reaktancja kołysaniowa/ i przedstawiono w postaci krzywych na rys.4. Na tym samym rysunku naniesiono dla porównania czasy Δt_1 obliczone przy uwzględnieniu wyłącznie momentu asynchronicznego i założeniu równego stopnia obciążenia silników.

Z wykresów tych wynika, że czas Δt_{1s} nie przekracza praktycznie czasu 0,1 sekundy, czyli przy stosowanych przerwach beznapięciowych 0,7 ... 1,5 s jest pomijalny. Największa wartość Δt_{1s} wypada przy stosunkowo zbliżonych do siebie mechanicznych stałych czasowych agregatów /dla $\frac{k_2}{k_1} = 0{,}6$/, czyli przeciwnie niż Δt_1. Poza tym Δt_1 rośnie ze zmniejszeniem się $f = \frac{{}_1P_{N1}p'_{m1}}{{}_2P_{N2}p'_{m2}}$ /podobnie jak Δt_1/. Dlatego wykresy wykonano dla najmniejszych wartości f, jakich się praktycznie można spodziewać przy $k_1 > k_2$.



Rys.4. Porównanie czasów Δ t spowodowanych momentem synchronicznym /Δ t_{1s}/ i asynchronicznym /Δt_1/ przy pełnym obciążeniu silników i przy założeniu średnich wartości T i x'

Wynika stąd wniosek /szerzej uzasadniony w omawianej pracy/, że chcąc sprawdzić wielkość wzajemnego wpływu silników przy SZR grupowym wystarczy wyznaczyć czas Δt_1 uwzględniający wyłącznie wpływ dodatkowego momentu asynchronicznego z pominięciem dodatkowego wpływu momentu synchronicznego.

2. Analiza wpływu parametrów wyjściowych

W części 1 wyprowadzono 2 zasadnicze wzory dające obraz wzajemnego wpływu silników w czasie SZR grupowego, a mianowicie wzór na przebieg momentu dodatkowego

$$m_{dl} = C_8\left(e^{-\frac{t}{T'}} - e^{-\frac{t}{T''}}\right) + C_{12}\, e^{-\frac{t}{T''}} \qquad /147/$$

oraz wzór na czas, o który należy skrócić przerwę beznapięciową przy SZR grupowym

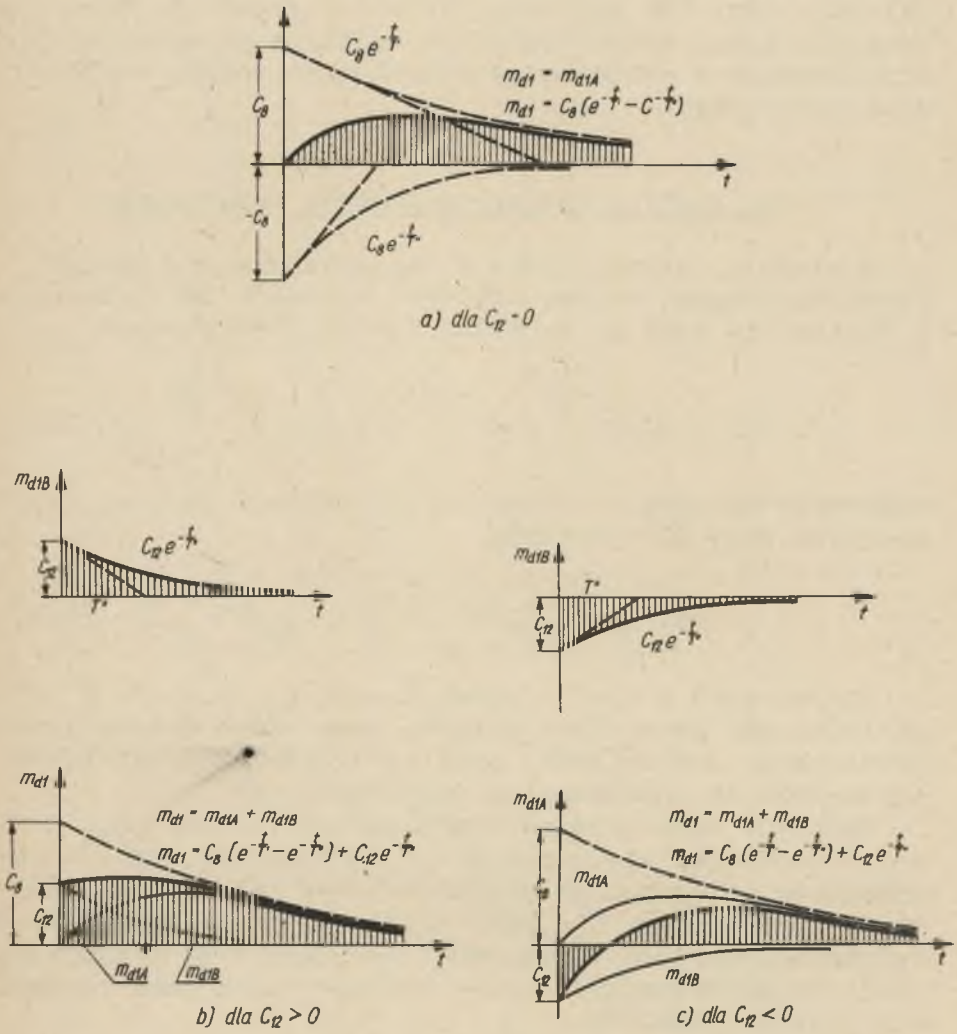
$$\Delta t_{1\,max} = C_8\left(T' - T''\right) + C_{12}\, T'' \qquad /173/$$

Występujące w tych wzorach stałe C_8, C_{12}, T' i T'' są funkcjami parametrów układu, dają zatem możność przeprowadzenia szczegółowej analizy wpływu poszczególnych parametrów na interesujące nas przebiegi.

Najpierw zanalizowano charakter przebiegów m_{dl} i Δt_1 w zależności od wielkości poszczególnych stałych, a następnie w kolejnych podpunktach wpływ parametrów silników, a mianowicie: p'_m, GD^2, n_s, l, P_N i s_N. Wszystkie te zależności zostały zobrazowane na odpowiednich wykresach [10]. Tu omówione będą tylko ogólnie ważniejsze wnioski wynikające z analizy.

W zależności od obciążenia silników /p'_m/ istnieją 3 możliwości kształtu przebiegu momentu dodatkowego m_{dl} przedstawione na rys.5:

a/ dla $\frac{p'_{m2}}{p'_{m1}} > 1$



Rys.5. Charakter przebiegów momentów dodatkowych w zależności od stałej C_{12}

b/ dla $\frac{p'_{m2}}{p'_{m1}} = 1$

c/ dla $\frac{p'_{m2}}{p'_{m1}} < 0$

co znalazło później całkowite potwierdzenie w pomiarach.

Zasadniczy wpływ na m_{dl} i $\Delta t_{1\,max}$ mają 2 stałe: C_8 i C_{12}, których wzrost powoduje zwiększenie zarówno m_{dl} jak i $\Delta t_{1\,max}$. Z wzorów wynika, że stałe te rosną ze wzrostem

$$\frac{l_2}{l_1}, \frac{p'_{m2}}{p'_{m1}}, \frac{p_{N2}}{p_{N1}}$$

czyli wzajemny wpływ silników rośnie ze wzrostem ilości, obciążenia i mocy znamionowych silników drugiej grupy.

Stała C_8 /a zatem m_{dl} i Δt_1/ rośnie prócz tego w dużym stopniu ze wzrostem

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{GD_1^2}{GD_2^2} \cdot \frac{n_{s1}^2}{n_{s2}^2} \cdot \frac{P_{N2}^2}{P_{N1}^2}$$

czyli ze wzrostem momentów zamachowych oraz prędkości obrotowych silników pierwszej grupy. Analiza wykazuje, że zmiany parametrów n_s, GD^2 i P_N są ze względów konstrukcyjnych tak wzajemnie ze sobą powiązane, że można przyporządkować określone współczynniki k do różnych rodzajów urządzeń potrzeb własnych elektrowni, przy czym

$$k = k' + k''$$

gdzie

k' - współczynnik silnika napędzającego, który jest w przybliżeniu stały dla wszystkich silników asynchronicznych /$k' = 0{,}2 \cdot 10^6$/,

k" - współczynnik mechanizmu napędzanego, który w zależności od rodzaju urządzeń potrzeb własnych elektrowni waha się w dosyć szerokich granicach, przy czym największy wypada dla bijakowych młynów węglowych /$k = 23 \cdot 10^6$/.

Współczynniki k zestawiono tabelarycznie [10] dla różnych urządzeń potrzeb własnych elektrowni, co umożliwia ich orientacyjną ocenę bez przeprowadzania pomiarów.

We wzorach występują jeszcze stałe

$$T' \text{ i } T''$$

których zależność od parametrów układu jest bardziej skomplikowana. Przeprowadzono ich analizę, która wykazała, że stała T' stosunkowo mało się zmienia ze zmianą parametrów układu i waha się na ogół w granicach 0,2 ... 0,3 s. Natomiast stała T'' jest tak mała /przeważnie $T'' < 0,1\ T'$/, że zmiana jej we wzorze na $\Delta t_{1\ max}$ wpływa na wynik bardzo nieznacznie.

Wykazano, że z punktu widzenia projektanta SZR interesujący jest tylko czas $\Delta t_{1\ max}$ obliczony dla przypadku maksymalnego obciążenia ruchowego wszystkich silników, gdyż to stanowi przypadek najgorszy. Wtedy

$$\frac{p'_{m2}}{p'_{m1}} \approx 1, \text{ czyli } C_{12} \approx 0$$

Wynika stąd, zwłaszcza wobec $T'' \ll T'$, że

$$\Delta t_{1\ max} = C_8\ T' + C_{12}\ T'' \approx C_8\ T'$$

Analiza zależności wyników od parametrów układu z uwzględnieniem realnych warunków pracy doprowadziła zatem do znacznego uproszczenia wzorów. Ostateczny wzór na $\Delta t_{1\ max}$ przybiera postać

$$\Delta t_{1\ max} = C_8\ T' = \frac{1 - \frac{k_1}{k_1}}{\frac{l_1\ P_{N1}}{l_2\ P_{N2}} + \frac{k_2}{k_1}} \cdot \frac{T}{2} \qquad /205/$$

zamiast wyprowadzonego poprzednio

$$\Delta t_{1\ max} = C_8 \left(T' - T''\right) + C_{12}\ T'' = \Delta t_{1A} + \Delta t_{1B}$$

który po wstawieniu wzorów na stałe przedstawiałby się następująco:

$$\Delta t_{1A} = \frac{1 - \frac{k_2}{k_1}}{\frac{l_1 P_{N1}}{l_2 P_{N2}}\eta_N^2 + \frac{k_2}{k_1}} \left[\frac{T}{2} - \frac{T}{2 + T\frac{364 \cdot 10^3}{k_1 \, s_{N1}}\left(\frac{l_1 P_{N1} k_1}{l_2 P_{N2} k_2}\eta_N^2 + 1\right)\left(\frac{l_2 P_{N2} s_{N2}}{l_1 P_{N1} s_{N1}} + 1\right)} \right]$$

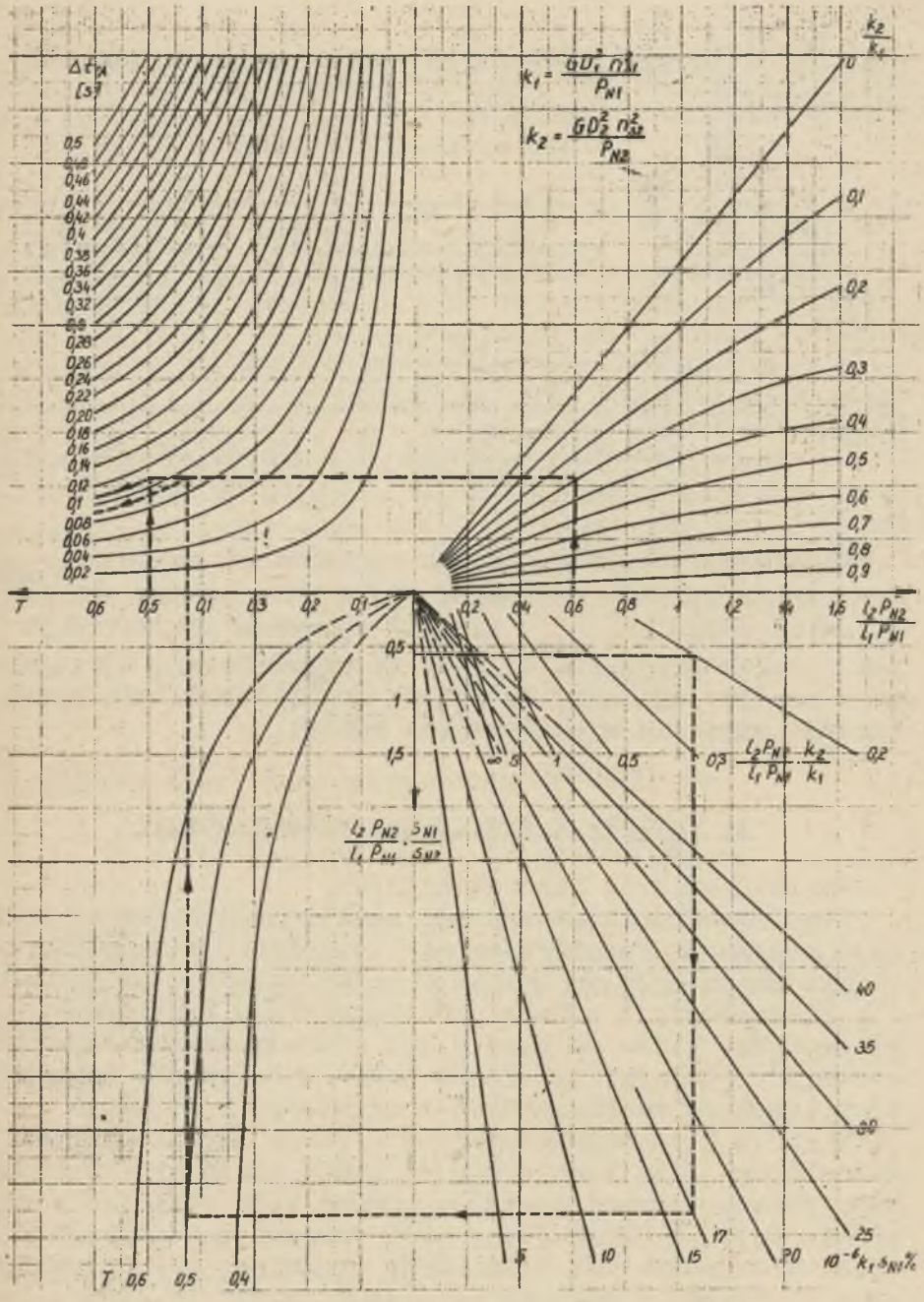
$$\Delta t_{1B} = \frac{\left(\frac{s_{N2}}{s_{N1}} - 1\right)\left(\frac{l_2 \, P_{N2} \, s_{N1}}{l_1 \, P_{N1} \, s_{N2}\eta_N^2} + 1\right) \cdot T}{2 + T\,\frac{364 \cdot 10^3}{k_1 \, s_{N1}}\left(\frac{l_1 \, P_{N1} \, k_1}{l_2 \, P_{N2} \, k_2}\eta_N^2 + 1\right)\left(\frac{l_2 \, P_{N2} \, s_{N2}}{l_1 \, P_{N1} \, s_{N1}} + 1\right)}$$

Dla umożliwienia szybkiego wyznaczania czasu $\Delta t_{1\,max}$ opracowano wykresy podane na rys.6 i 7. Na ich podstawie określić można $\Delta t_{1\,max}$ zarówno sposobem przybliżonym jak i dokładniejszym. Wykresy te potwierdzają wyciągnięty z analizy wniosek, że metoda przybliżona daje praktycznie zupełnie wystarczające wyniki.

3. Pomiary i praktyczne wykorzystanie

Wyniki pomiarów laboratoryjnych.

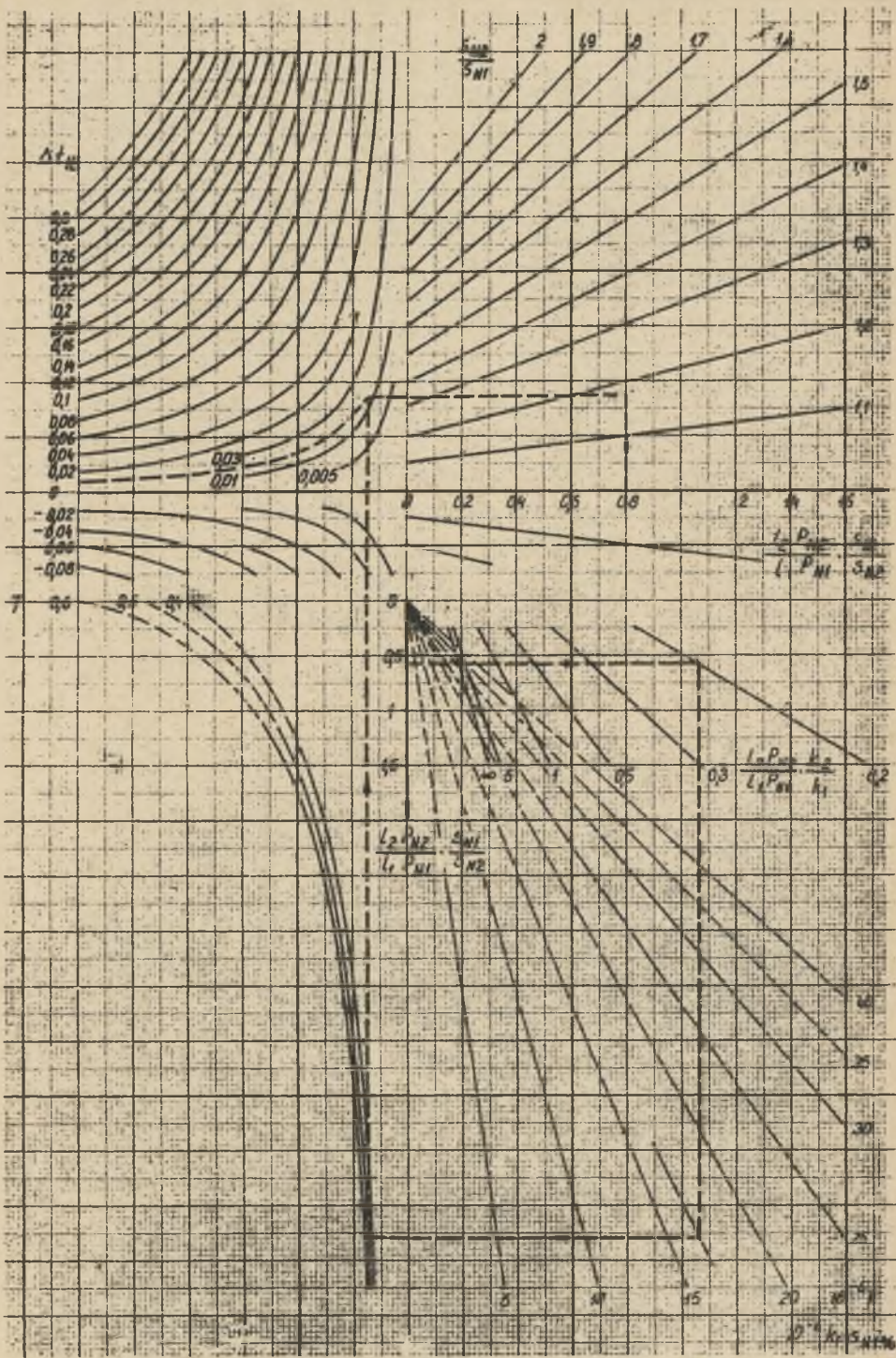
Dla sprawdzenia słuszności analizy teoretycznej wykonano pomiary laboratoryjne na 3 silnikach w układzie, w którym można było je wyłączać indywidualnie lub grupowo /po 2 względnie 3 silniki równocześnie/. Zastosowano automatykę, która po czasie 0,7 sekundy załączała silniki powtórnie. Silniki obciążono przez zabudowanie odpowiednich hamulców mechanicznych z regulacją w zakresie 0,15 ... 0,9 pełnego obciążenia. Prócz tego sprzężono wał silnika 1 ze specjalnie do badań wykonanym mechanizmem, którego moment zamachowy można było zmieniać w zakresie 0 ... 4 krotnej wartości momentu zamachowego silnika. W układzie tym można było uzyskiwać SZR indywidualny i grupowy w różnych warunkach pracy, tj. przy różnych stosunkach $\frac{P_{m2}}{P_{m1}}, \frac{l_2}{l_1}, \frac{GD_2^2}{GD_1^2}$. Oscylografowano przy tym przebiegi napięć, prądów, mocy czynnych i prędkości obrotowych silnika 1, tj. tego napędu, który doznaje pogorszenia warunków pracy przy SZR grupowym.



Rys.6. Graficzne wyznaczanie czasu Δt_{1A}

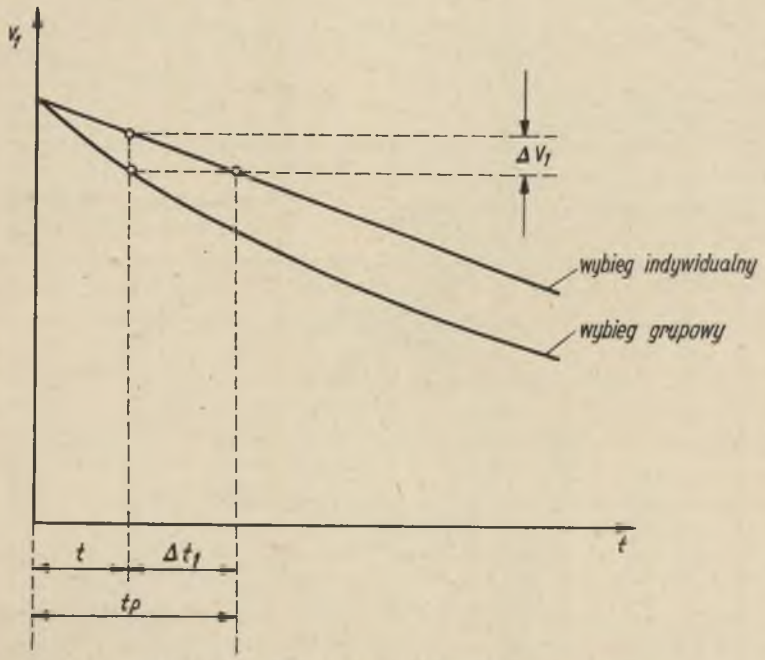
$$\Delta t_1 = \Delta t_{1A} + \Delta t_{1B}$$

(—— —— sposób przybliżony ----- sposób dokładniejszy)



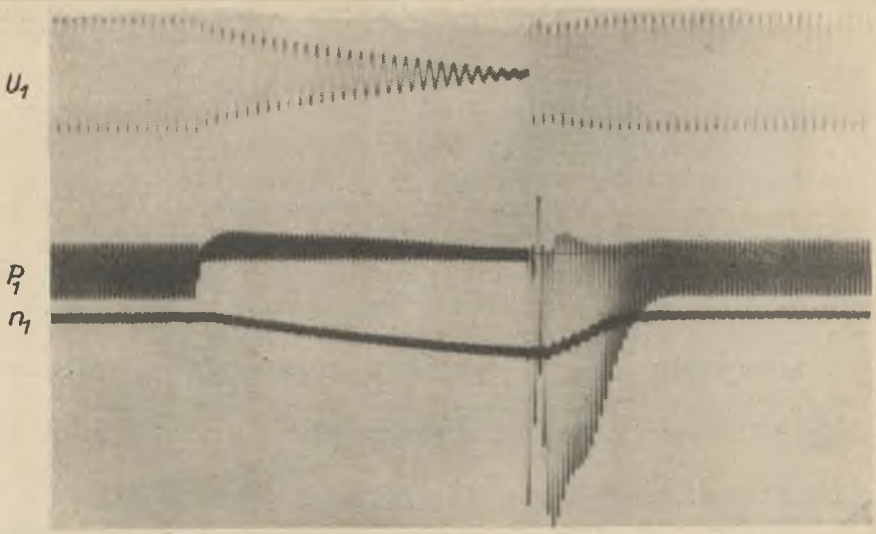
Rys.7. Graficzne wyznaczanie czasu Δt_{1B}

Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń teoretycznych zarówno pod względem kształtu przebiegów jak i maksymalnych wartości m_{d1} i Δt_1. Wartości pomiarowe m_{d1} wyznaczone zostały z oscylogramów mocy przekazywanej pomiędzy silnikami, a czasy Δt_1 - z oscylogramów prędkości obrotowych przy wybiegach indywidualnych i grupowych /w sposób przedstawiony na rys.8/.



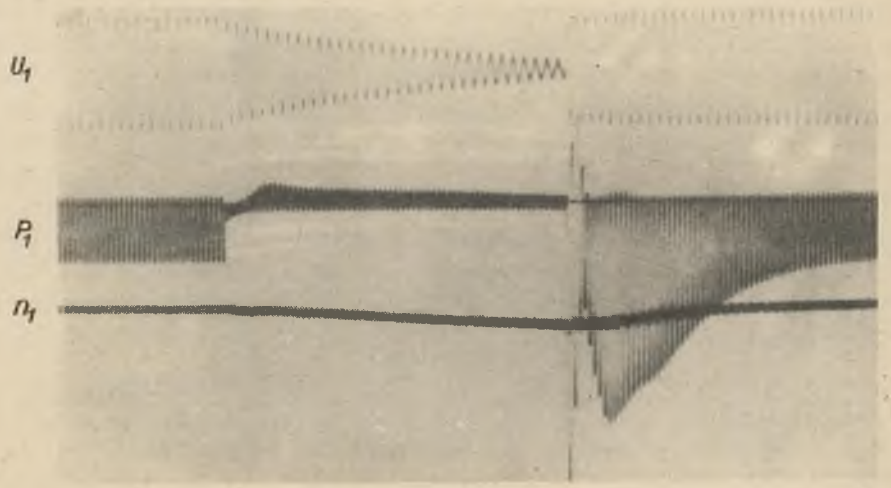
Rys.8. Wyznaczanie czasu Δt_1

W związku z przyjmowanymi założeniami upraszczającymi przy wyprowadzaniu wzorów przebiegi obliczone wypadły w całym zakresie powyżej pomierzonych, nie odbiegały jednak od nich zbyt dużo, a pozostawały przy tym bezpieczne. Kształt uzyskanych przebiegów jak i wpływ zmian różnych parametrów układu okazał się zupełnie zgodny z wnioskami z analizy teoretycznej. W niniejszym artykule przedstawiono tylko przykładowo 2 oscylogramy /rys.9 i 10/ oraz zestawienie krzywych pomiarowych i obliczeniowych $m_{d1} = f/t/$ przy różnych wartościach $\frac{p'_{m2}}{p'_{m1}}$ /rys. 11 i 12/, które potwierdzają powyższe wnioski. Należy za-



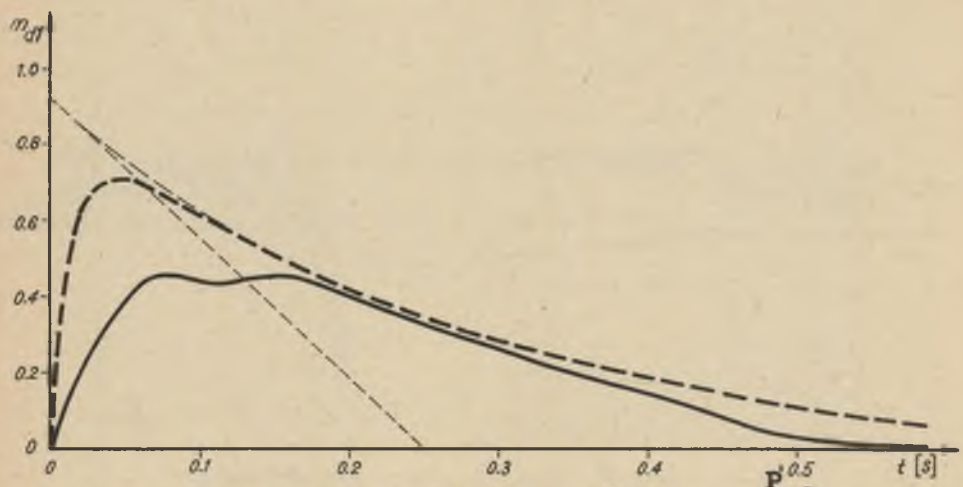
Rys.9. Oscylogram przebiegów
w czasie SZR-u grupowego 2 silników o parametrach:
U_N = 380 V, P_N = 4,3 kW, n = 2920 obr/min
w przypadku, gdy silnik 1 jest niedociążony

$$\frac{P'_{m2}}{P'_{m1}} = 1,9$$



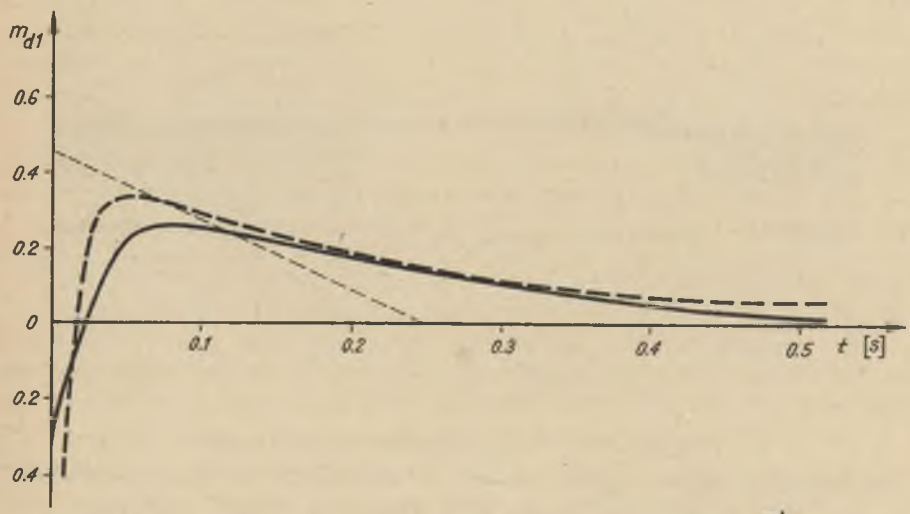
Rys.10. Oscylogram przebiegów
w czasie SZR-u grupowego 2 silników o parametrach:
U_N = 380 V, P_N = 4,3 kW, n = 2920 obr/min
w przypadku, gdy silnik 2 jest niedociążony

$$\frac{P'_{m2}}{P'_{m1}} = 0,6$$



Rys.11. Przebieg $m_{d1} = f/t/$ w przypadku $\frac{P'_{m2}}{P'_{m1}} = 1$

(--- wg obliczeń, ——— wg pomiarów)



Rys.12. Przebieg $m_{d1} = f/t/$ w przypadku $\frac{P'_{m2}}{P'_{m1}} = 0,6$

(---wg obliczeń, ——— wg pomiarów)

uważyć, że pomimo stosunkowo dużych wartości momentów dodatkowych /zbliżonych do wartości znamionowych/, ich wpływ na wybiegi grupowe i samorozruch okazał się mały. Czasy Δt_1 nie przekraczały wartości 0,2 s, a przeważnie były znacznie mniejsze, praktycznie zupełnie pomijalne.

W ogólności pomiary laboratoryjne wykazały, że wyprowadzone wzory nawet w formie uproszczonej dają praktycznie zupełnie wystarczające wyniki. Niezależnie od tego zarówno z pomiarów jak i z obliczeń wynika, że wzajemny wpływ silników przy SZR grupowym jest przeważnie pomijalny.

W dalszym ciągu 3 części artykułu przedstawione będą pokrótce wyniki pomiarów przemysłowych przeprowadzonych w elektrowniach i innych zakładach przemysłowych. Pomiary te mają inny cel niż laboratoryjne. W związku z ruchem zakładu nie można tu dowolnie dobierać i łączyć interesujących nas napędów, ani systematycznie zmieniać parametrów układu, tak że pomiary te nie mogą służyć za podstawę do bardziej wnikliwej analizy. W związku z powyższym w artykule nie załączono wyników pomiarów przemysłowych, które stanowią materiał bardzo obszerny /9/, poza krótkim omówieniem ich przebiegu i wniosków. Pomiary te są jednak ważnym sprawdzianem pomiarów laboratoryjnych, przeprowadzonych w sztucznie stworzonych warunkach i umożliwiają w pewnych granicach bezpośrednią ocenę wielkości wzajemnego wpływu silników w warunkach rzeczywistych.

Pierwsze pomiary przemysłowe przeprowadzono w roku 1954 w jednym z większych zakładów przemysłu chemicznego, w którym można było dobrać napędy o różnych parametrach znamionowych i napędzających różne mechanizmy. Pomiary te przeprowadzono na 3 grupach silników różniących się:

a/ napięciem zasilania:
- I grupa - silniki 380 V,
- II grupa - silniki 380 V i 6000 V sprzężone przez transformator,
- III grupa - silniki 6000 V;

b/ mocą znamionową:
- I grupa - silniki 2,2 kW i 35,3 kW,
- II grupa - silniki 15 kW, 250 kW i 305 kW,
- III grupa - silniki 315 kW, 320 kW i 640 kW;

c/ synchronicznymi prędkościami obrotowymi:
I grupa - silniki szybkobieżne, n_s = 1500 obr/min,
II grupa - silniki o różnych n_s = 585 - 2960 obr/min,
III grupa - silniki wolnobieżne, n_s = 115 - 125 obr/min;

d/ charakterystykami obciążenia mechanizmów napędzanych:
I grupa - napędy mechanizmów o podobnych charakterystykach /parabolicznych/: $M=Cn^2$,
II grupa - napędy mechanizmów o różnych charakterystykach: $M = C_1 n^2$ i $M = C_2$,
III grupa - napędy mechanizmów o podobnych charakterystykach /prostoliniowych/: $M = C_2$.

Pomiary przeprowadzono przy pomocy 2 oscylografów pętlicowych i 1 katodowego, przy czym mierzono przebiegi napięć, prądów mocy i prędkości obrotowych badanych napędów w czasie SZR indywidualnego i grupowego. Wszystkie oscylogramy przerysowano w jednej skali w jednostkach względnych dla umożliwienia dobrego ich porównania.
W ciągu roku 1955 wykonano podobne pomiary na niektórych napędach potrzeb własnych 3 elektrowni zawodowych. W pomiarach tych połączono ze sobą faktycznie współpracujące w ruchu napędy, a nie dobierano ich sztucznie /jak poprzednio/ dla uzyskania jak największego wzajemnego wpływu. Wpłynęły na to względy ruchowe i możliwości łączeniowe. Sposób ten ma jednak tę dobrą stronę, że wyniki dają obraz wzajemnego wpływu silników w praktycznie zachodzących warunkach pracy. Pomiary wykonano na głównych napędach kotłów rusztowych i pyłowych /z wyjątkiem młynów węglowych/ oraz na napędach pomp kondensatu.

Wyniki tych pomiarów wykazały bardzo mały wpływ wzajemnego sprzężenia silników na krzywe wybiegów. Obniżenie się ich wypadło na oscylogramach przeważnie zaledwie zauważalne, a czasy Δt_1 pomijalne. Czas Δt_1 okazał się stosunkowo duży /około 1 sekundy/ jedynie w przypadku specjalnych napędów we wspomnianym zakładzie przemysłu chemicznego /np. przy sprzężeniu napędu pompy mycia miedziowego 320 kW z napędem sprężarki powietrza 315 kW/. Stwierdzono natomiast, że czasem nawet znaczne podwyższenie krzywej wybiegu nie ma przy projektowaniu SZR żadnego praktycznego znaczenia.

Charakter przebiegów oscylografowanych wypadł podobny jak w pomiarach laboratoryjnych. Prąd wyrównawczy dochodził do wartości prądu przed wyłączeniem. Przeważnie po czasie 0,5 s po wyłączeniu /najdalej 1 s/ prąd ten nie przekraczał już 0,1 wartości prądu znamionowego.

Tych wniosków z wycinkowo przeprowadzanych pomiarów ruchowych nie można jako takich uogólniać, dają one dopiero obraz w zestawieniu z wynikami z pomiarów laboratoryjnych i z teoretycznych obliczeń.

Przykłady obliczeniowe oraz wyniki obliczeń przeprowadzonych dla kilku układów elektrowni, które się tu pomija, /19/ prowadzą do wniosku, że wzajemny wpływ silników w elektrowniach nie odgrywa praktycznie dużej roli i można go przeważnie pomijać. Sprawdzenia wymagają tylko wyjątkowo niekorzystne układy z bijakowymi młynami węglowymi. Główna przyczyna tego leży we wzajemnych powiązaniach parametrów P_N, n_s i GD^2 stosowanych w elektrowniach agregatów i niezbyt dużej ilości silników w grupie.

4. Wnioski końcowe

Badania miały na celu zanalizowanie wzajemnego wpływu silników dla wykazania, czy można go pomijać w przeprowadzonych obliczeniach przydatności silników do SZR.

Stwierdzono, że w czasie wybiegu elektrycznie połączonych silników mogą powstać nawet znaczne dodatkowe momenty obrotowe, których przebieg w czasie uchwycono we wzorach w zależności od parametrów układu i sprawdzono metodą pomiarową. Momenty te powodują zmiany krzywych wybiegów i rozbiegów przy SZR grupowym oraz dodatkowe nagrzania uzwojeń związane ze wzrostem czasu samorozruchu. Wykazano, że dla napędów elektrownianych /z wyjątkiem napędów bijakowych młynów węglowych/ wpływ ten jest pomijalny i obliczenia przeprowadzane przy założeniu SZR indywidualnego są praktycznie słuszne i dla SZR grupowego.

Zasady tej nie można jednak rozszerzyć na inne zakłady przemysłowe, w których stosowane są napędy o znacznie szerszej skali parametrów. W tych przypadkach wskazane jest przy projektowaniu SZR sprawdzić czas, o który krótsza powinna być przerwa beznapięciowa przy SZR grupowym według wyprowadzonego wzoru uproszczonego

$$t_1 = \frac{T}{2} \cdot \frac{1 - \frac{k_2}{k_1}}{\frac{I_1 P_{N1}}{I_2 P_{N2}} \eta_N^2 + \frac{k_2}{k_1}} \qquad /205/$$

gdzie

$$k_1 = \frac{GD_1^2 \, n_{s1}^2}{P_{N1}}$$

$$k_2 = \frac{GD_2^2 \, n_{s2}^2}{P_{N2}}$$

$$\left(k_1 > k_2\right).$$

Z uwagi na wzajemne powiązania parametrów: GD^2, n_s, P_N przy stosowanych konstrukcjach napędów - czasy te wypadają przeważnie bardzo małe i można je pominąć. W niektórych jednak przypadkach /np. przy SZR grupowym napędów o bardzo różniących się mechanicznych stałych czasowych/ mogą one wypaść większe. Wtedy powinno się obliczenie powtórzyć przy pomocy wzoru dokładniejszego, względnie wyznaczyć Δt_1 graficznie z wykresów na rys.6, 7 i uwzględnić w projekcie SZR przez skrócenie przerwy beznapięciowej lub inną zmianę w układzie.

LITERATURA

1. Fieguth H.O.: Schnellumschaltung in Kraftwerks - Eigenbedarfsanlagen. Elektrotechnische Zeitschrift Nr 22, Berlin, 1953.

2. Gogolewski Z.: Napęd elektryczny PWT, Warszawa 1956.

3. Praca zbiorowa pod red. W.Kołka i A.Żeleńskiego: Samoczynne załączanie rezerw w elektrowniach cieplnych. Ministerstwo Energetyki, Zarząd Techniki, Warszawa 1955.

4. Lewis D.G. Marsch W.D.: Transfer of Steam-Electric Generating Station Auxiliary Busses. Transcactions Amer.Inst.El. Engins, New York, 1955.

5. Paszek W.: Wyznaczenie stałej czasowej zanikania pola magnetycznego silników asynchronicznych. Opracowanie Zakładu Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice 1957 r.

6. Roggendorf A.: Der Eigenbedarf mittlerer und grosser Kraftwerke. J.Springer, 1952.

7. Skoczyński Z., Nowacki P.: Zwarcia w wysokonapięciowych układach elektroenergetycznych. PWT, Warszawa 1954 r.

8. Syromiatnikow J.A.: Praca silników asynchronicznych. PWT, Warszawa 1954 r.

9. Żeleński A., Kuszke H.: Niektóre zagadnienia z SZR grupowego /wyniki pomiarów przemysłowych/. Opracowanie Zakładu Badań i Pomiarów "Energopomiar", Gliwice, 1956 r.

10. Żeleński A.: Wpływ grupowego wybiegu silników na samorozruch przy SZR. Praca doktorska złożona na Politechnice Śląskiej w Gliwicach w 1959 r.

Резюме

В статье приведены результаты исследований [10] относительно взаимого влияния соединенных электрически двигателей во время их группового выбера при автоматическом повторном включении резервов в электрических станциях и других промышленных предприятиях а также сделанные на их основании выводы, касающиеся проектирования схем автоматического включания резервов и автоматики АВР.

Rèsumè

L'auteur prèsente les rèsultats d'un examen analytique de l'influence rèciproque de coupure des moteurs asynchrones et leur reenclenchement automatique sur le sourse de rèserve dans les centrales èlectriques. Les conclusions sont faites sur les schèmas des dispositifs de rèenclenchement automatique.