ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 82 Elektryka z.16 1963

ADAM RÓŻYCKI

Katedra Maszyn Elektrycznych

POWSTAWANIE USZKODZEŃ W UZWOJENIACH WIRNIKÓW DUŻYCH TURBOGENERATORÓW

Streszczenie. W eksploatacji dużych turbogeneratorów synchronicznych zdarzają się uszkodzenia izolacji spowodowane odkształceniami uzwojeń wzbudzających. Ogólnie uważa się, że przyczyną tego jest tradycyjnie przeprowadzany rozruch. Celem artykułu jest naświetlenie zjawisk cieplno-mechanicznych, występujących przy tradycyjnym rozruchu i omówienie sposobów, które mogłyby zapobiec trwałym uszkodzeniom uzwojeń wzbudzających.

1. Badanie zjawisk cieplno-mechanicznych na modelu

Punktem wyjścia dla zbadania zjawisk cieplno-mechanicznych powodujących uszkodzenia uzwojeń wzbudzających dużych turbogeneratorów synchronicznych, znajdujących się w jednostajnym ruchu obrotowym, a następnie nagrzanych do stanu cieplnie ustalonego będzie stworzenie, może nawet dosyć uproszczonego modelu, który pozwoli na uchwycenie zasadniczych przyczyn powodujących te uszkodzenia. Modelem tym będzie izolowany pręt z miedzi, ujęty w masywnej obejmie stalowej, wprowadzony w ruch obrotowy z prędkością znamionową n_N, a następnie tak podgrzany aby w stanie ustalonym pręt miedziany posiadał temperaturę T_{CuN}, zaś obejma stalowa temperaturę T_{FeN} (rys.1).

Rozpatrzmy najpierw, jakie siły działają na pręt miedziany gdy układ posiada temperaturę otoczenia T_0 i wiruje z prędkością obrotową n_N.

Na elementarnej długości dx pręta działa elementarna siła odśrodkowa wyrażona wzorem

$$dP_x = \omega^2 \cdot r \cdot \frac{a \cdot b \cdot \gamma}{g} \cdot dx \quad [kG]$$

gdzie:

ω - prędkość kątowa $= \frac{\pi \cdot n_N}{30}$ $\left[\frac{1}{sek}\right]$

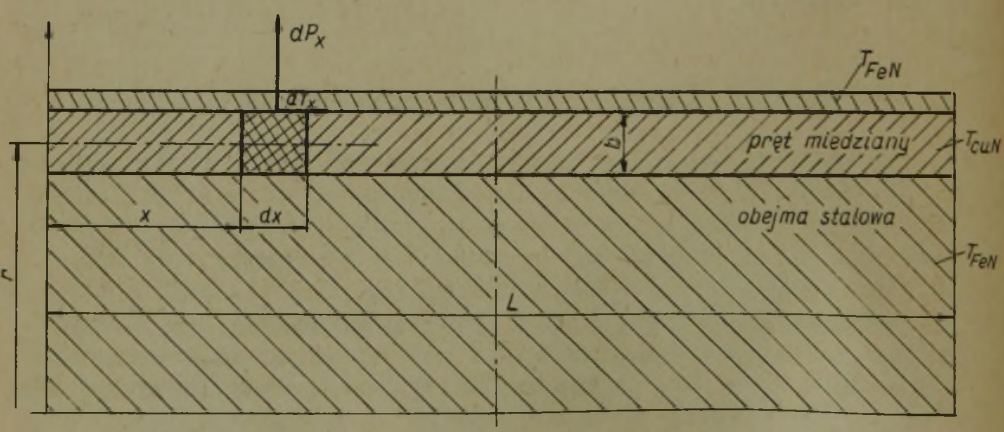
n_N - prędkość obrotowa n_N $\left[\frac{obr}{min}\right]$

r - promień środka ciężkości pręta [cm]

a,b - wymiary pręta [cm, cm]

γ - ciężar właściwy miedzi $= 8{,}9 \cdot 10^{-3}$ $\left[\frac{kG}{cm^3}\right]$

g - przyspieszenie ziemskie g = 981 $\left[\frac{cm}{sek^2}\right]$



Rys.1. Rysunek szkicowy rozpatrywanego modelu

Siła ta przyciska pręt do powierzchni podtrzymującej. Załóżmy, że w czasie wirowania układu podgrzaliśmy pręt do temp. T_{CuN}, zaś obejmę stalową do temp. $T_{FeN} < T_{CuN}$ od wspólnej początkowej temperatury T_o. Względne wydłużenie pręta wynosiłoby wtedy

$$\Delta L = \left[\alpha_{cu} \cdot (T_{CuN} - T_o) - \alpha_{Fe} (T_{FeN} - T_o) \right] \cdot L \quad [cm]$$

gdzie:

α_{cu} - współczynnik cieplnej rozszerzalności miedzi

$\alpha_{cu} = 17.10^{-6}$ [1/°C]

α_{Fe} - współczynnik cieplnej rozszerzalności stali

$\alpha_{Fe} = 11,5.10^{-6}$ [1/°C]

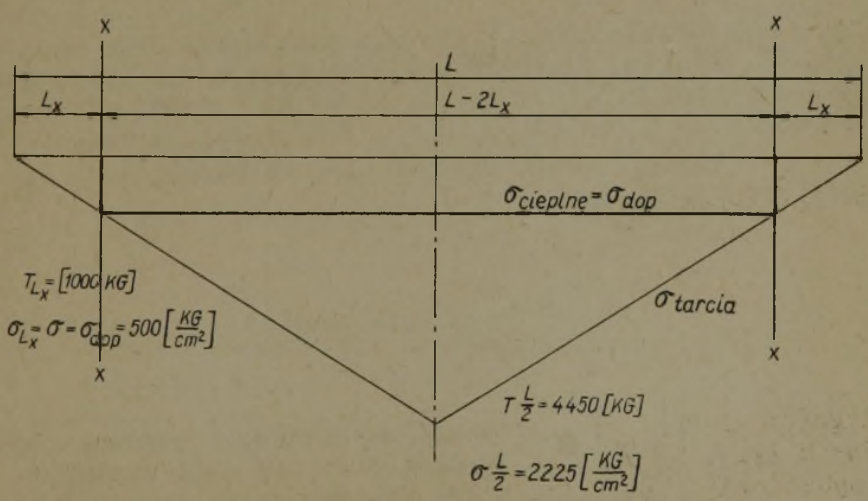
L - długość pręta i obejmy stalowej w temperaturze T_o [cm.]

Na skutek symetrii układu końce pręta wydłużałyby się w obie strony w kierunku zewnętrznym od środka pręta. Każdemu dążeniu do poosiowego ruchu pręta przeciwstawiać się będzie jednak elementarna siła tarcia

$$dT_x = \mu dPx \quad [kG]$$

gdzie:

μ - współczynnik tarcia na powierzchni styku w miejscu działania siły odśrodkowej.



Rys.2. Rozkład sił i naprężeń działających w pręcie miedzianym modelu

Całkowita siła tarcia przeciwstawiająca się ruchowi pręta na odcinku odległym o x od skrajnych boków pręta wynosi

$$T_x = \mu \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \frac{a \cdot b \cdot \gamma}{g} x \ [kG]$$

czyli zależy od odległości od końca pręta. Dla pręta o wymiarach a = 2 [cm], b = 1 [m], L = 500 [cm] przy μ = 0,2, wirującego z prędkością n_N = 3000 [obr/min] na promieniu r = 50 [cm] rozkład siły tarcia wzdłuż jego długości pokazany jest na rys.2, gdzie dla

$$x = 0 \quad T_0 = 0$$

$$x = \frac{L}{2} \quad T_{\frac{L}{2}} = 0{,}2 \cdot \left(\frac{3.14 \cdot 3000}{30}\right)^2 \cdot 50 \cdot \frac{1 \cdot 2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3}}{981} \cdot 250 =$$

$$= 4450 \ [kG]$$

Odpowiednio do wykresu sił tarcia przebiega wykres naprężeń w pręcie (rys.2).
Przy czym

$$\sigma_{Lx} = \frac{T_{Lx}}{a \cdot b} \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$$

Aby nastąpiło przesunięcie pręta nie powodujące jego odkształcenia trwałego, naprężenia występujące w nim muszą być mniejsze od granicy sprężystości, które dla miedzi miękkiej wynoszą około σ_{dop} = 500 [kG/cm²]. Z równości naprężeń $\sigma_{dop} = \sigma_{Lx}$ obliczyć można długość Lx, na której może nastąpić przesuwanie pręta

$$Lx = \frac{\sigma_{dop} \cdot g}{\mu \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \gamma} = 56 \ [cm]$$

Na długości $L-2L_x$ pręt jest unieruchomiony i poddany jest działaniu siły T_{Lx}. Wobec tego, że pręt nie może wydłużyć się, wydłużenie pręta ΔL, które wskutek zmian temperatury miałoby miejsce, gdyby pręt mógł się swobodnie przemieszczać, równe jest co do bezwzględnej wartości skróceniu pręta ΔL_T pod działaniem siły T_{Lx}.

Stąd zachodzi równość

$$\Delta L = \Delta L_T$$

czyli

$$(L-2L_x) \cdot \left[\alpha_{cu}(T_{cu}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe}-T_o)\right] = \frac{T_{Lx} \cdot (L-2L_x)}{E_{cu} \cdot F}$$

$$\alpha_{cu}(T_{cu}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe}-T_o) = \frac{\sigma_{Lx}}{E_{cu}}$$

czyli

$$\sigma_{Lx} = E_{cu}\left[\alpha_{cu}(T_{cu}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe}-T_o)\right]$$

gdzie:

E_{cu} - moduł sprężystości miedzi $E_{cu} = 10^6 \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$

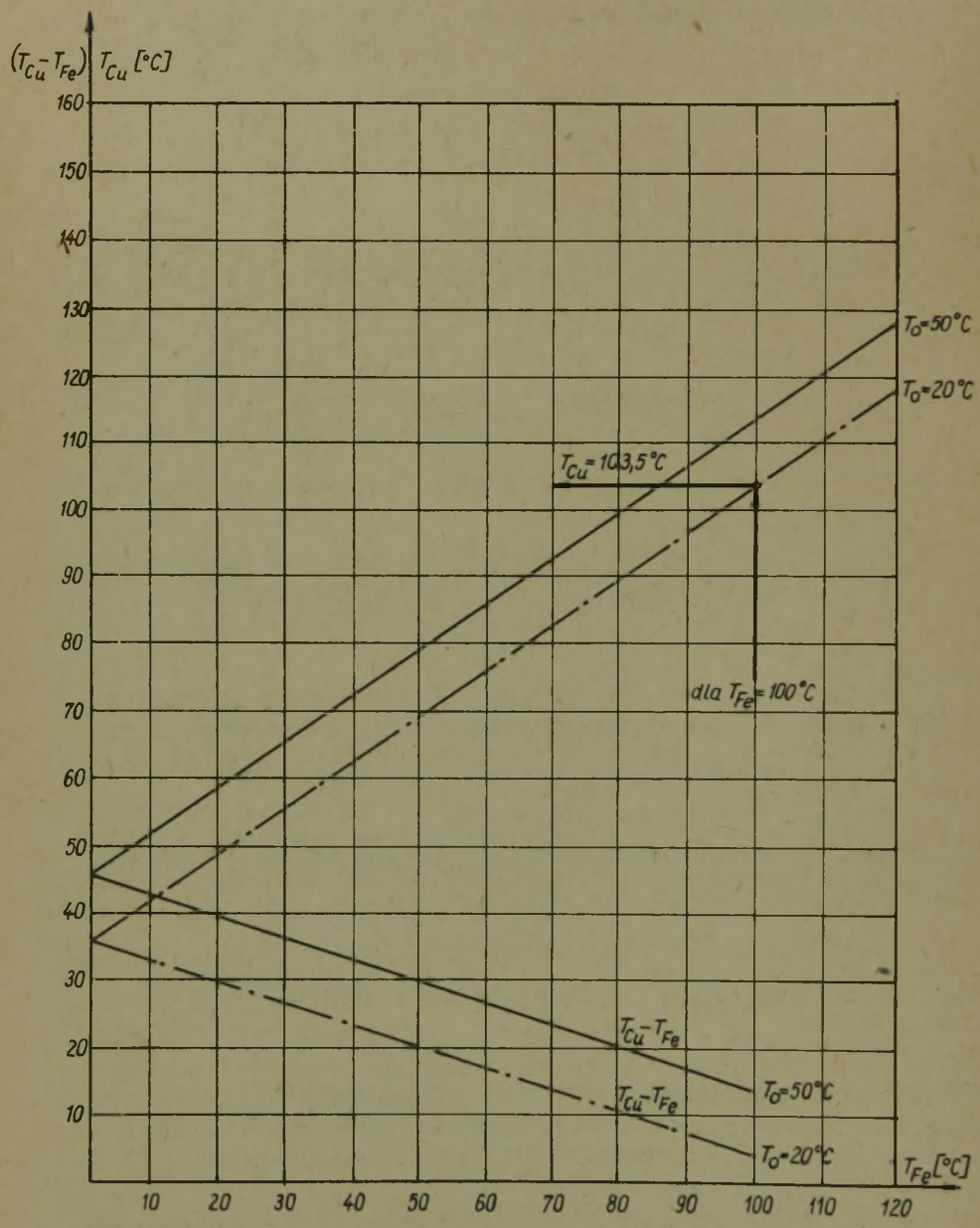
F - $a \cdot b$ $\left[cm^2\right]$

Aby w unieruchomionym pręcie naprężenia nie przekroczyły $\sigma_{Lx} = \sigma_{dop}$ to

$$\sigma_{dop} = E_{cu} \cdot \left[\alpha_{cu}(T_{cu}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe}-T_o)\right]$$

Maksymalne, równoczesne wartości temperatur T_{cu}, T_{Fe} do jakich można podgrzać pręt miedziany i obejmę stalową (od znanej wartości temperatury T_o), aby nie przekroczyć podanych warunków, obliczamy ze wzoru

$$T_{cu} = \frac{\sigma_{dop}}{\alpha_{cu} \cdot E_{cu}} + T_o \frac{\alpha_{cu}-\alpha_{Fe}}{\alpha_{cu}} + \frac{\alpha_{Fe}}{\alpha_{cu}} \cdot T_{Fe}$$



Rys.3. Zależność $T_{Cu} = f(T_{Fe})$ dla zachowania naprężeń dopuszczalnych w pręcie miedzianym

Wykres na rys.3 podaje zależności $T_{Cu} = f(T_{Fe})$ w stanie cieplnie ustalonym dla temperatury początkowej $T_o = 20^oC$ i $T_o = 50^oC$, oraz różnice temperatur $(T_{Cu}-T_{Fe})$ istniejącą między nagrzanym prętem a obejmą stalową.

Na podstawie zależności podanej na wykresie możemy sformułować następujące wnioski:

1) aby naprężenia w miedzi nie spowodowały trwałego odkształcenia pręta, temperatura pręta i obejmy stalowej muszą <u>równocześnie</u> posiadać pewną określoną wartość, np:

przy $T_o = 20^oC$ i $T_{Fe} = 100^oC$ $T_{Cu} = 103,5^oC$

przy $T_o = 20^oC$ i $T_{Fe} = 20^oC$ $T_{Cu} = 49,4^oC$

2) każdej parze temperatur T_{Cu}, T_{Fe} odpowiada różny co do wartości przyrost temperatury $T_{Cu}-T_{Fe}$, np:

przy $T_o = 20^oC$ i $T_{Fe} = 100^oC$ $T_{Cu}-T_{Fe} = 3,5^oC$

przy $T_o = 20^oC$ i $T_{Fe} = 20^oC$ $T_{Cu}-T_{Fe} = 29,4^oC$

3) nie jest możliwe w stanie ustalonym przy założonej temperaturze stali np. $T_{Fe} = 100^oC$ podgrzać miedź np. do temperatury $T_{Cu} = 140^oC$ bez przekroczenia naprężeń, które spowodować mogą ewentualnie uszkodzenie pręta.

Zbadajmy obecnie jakie skutki wynikną, gdy podgrzewać będziemy opisany układ miedź - stal po nadaniu mu obrotów znamionowych od temp. $T_o = 20^oC$, do temperatury $T_{Fe_N} = 100^oC$, $T_{Cu_N} = 140^oC$. Rozważania przeprowadzimy w zakresie ustalonego stanu cieplnego. Załóżmy, że na nieznanej jeszcze długości $L-2L_{x_1}$ pręt będzie unieruchomiony. W tym obszarze wystąpi więc warunek zgodności odkształceń, który możemy zapisać następująco:

$$(L-2L_{x_1}) \cdot \left[\alpha_{Cu_N}(T_{Cu_N}-T_o)-\alpha_{Fe}(T_{Fe_N}-T_o)\right] = \frac{T_{L_{x_1}}(L-2L_{x_1})}{E_{Cu}\cdot F}$$

stąd

$$\alpha_{Cu}(T_{Cu_N}-T_o)-\alpha_{Fe}(T_{Fe_N}-T_o) = \frac{T_{L_{x_1}}}{E_{Cu}\cdot F}$$

$$E_{Cu}\left[\alpha_{Cu}(T_{Cu}-T_o)-\alpha_{Fe}(T_{Fe}-T_o)\right] = \frac{T_{L_{x_1}}}{F}$$

czyli

$$\sigma_{cieplne} = \sigma_{tarcia}\, L_{x_1}$$

gdy

$$\sigma_{cieplne} = 10^6\left[17.10^{-6}(140-20)-11,5.10^{-6}(100-20)\right] =$$

$$= 1120\left[\frac{kG}{cm^2}\right]$$

to

$$T_{L_{x_1}} = \sigma_{ciepln.}\, F = 1120.2 = 2240\ [kG]$$

Wobec powyższego pręt może przesuwać się na odcinku

$$L_{x_1} = \frac{T_{L_{x_1}}}{\mu\cdot\omega^2\cdot r\cdot\frac{a.b.\gamma}{g}} = \frac{2240}{0,2.314^2.50\frac{2.8.9.10^3}{981}} = 119\ [cm]$$

zaś unieruchomiony jest na odcinku

$$L - 2L_{x_1} = 500 - 2.119 = 262\ [cm]$$

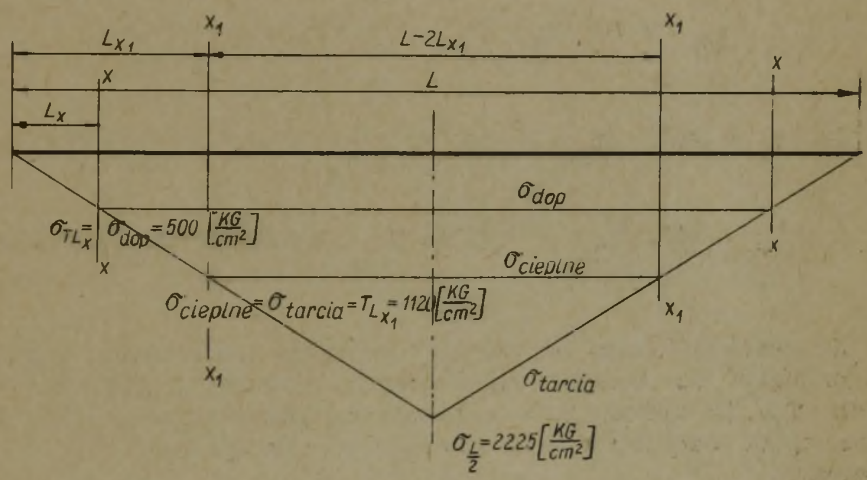
Na rysunku 4 przedstawiono rozkład naprężeń działających na poszczególnych odcinkach pręta. W zakresie

L_x $\sigma_{dop} < \sigma < \sigma_{tarcia}$ pręt wydłuża się swobodnie

$L_{x_1} - L_x$ $\sigma > \sigma_{tarcia} > \sigma_{dop}$ pręt wydłuża się trwale

$L - 2L_{x_1}$ $\sigma_{dop} < \sigma < \sigma_{tarcia}$ pręt skraca się trwale

gdzie σ są naprężeniami w pręcie.



Rys.4. Rozkład sił i naprężeń działających w pręcie miedzianym w warunkach $T_{Cu_N} = 140^oC$, $T_{Fe_N} = 100^oC$

Z przedstawionej analizy naprężeń działających w pręcie dochodzimy do wniosku, że podgrzanie elementów rozpatrywanego układu do z góry określonych temperatur tj. $T_{Cu_N} = 140^oC$, $T_{Fe_N} = 100^oC$ po nadaniu mu znamionowej prędkości obrotowej $n_N = 3000$ [obr/min] wywoła trwałe odkształcenie pręta na długości $L-2L_x$, gdyż w tych zakresach długości naprężenia występujące w pręcie znacznie przekraczają naprężenia sprężystości dla miedzi. Nasuwa się więc pytanie, jakie zastosować środki zapobiegawcze, aby uniknąć tych odkształceń. Jednym z nich będzie tzw. wstępne podgrzewanie układu miedź-stal przed rozpędzeniem układu do prędkości znamionowej. Określenie temperatur do których należy podgrzać pręt T_{Cu_x}

i obejmę stalową T_{Fe_x} w stanie spoczynku układu, aby naprężenia w pręcie w wirującym układzie przy temperaturze pręta $T_{Cu_N} = 140^oC$ i obejmy stalowej $T_{Fe_N} = 100^o$ nie były większe od σ_{dop} będzie celem dalszej analizy. Naprężenia, które musimy zredukować przez tzw. wstępne podgrzewanie wynoszą

$$\sigma_{zred} = \sigma_{max} - \sigma_{dop}$$

gdzie

$$\sigma_{max} = E_{Cu}\left[\alpha_{Cu}\cdot(T_{Cu_N}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe_N}-T_o)\right]$$

i dla $T_o = 20^o$, $T_{Cu_N} = 140^oC$, $T_{Fe_N} = 100^oC$ $\sigma_{max}=1120$ kG/cm^2

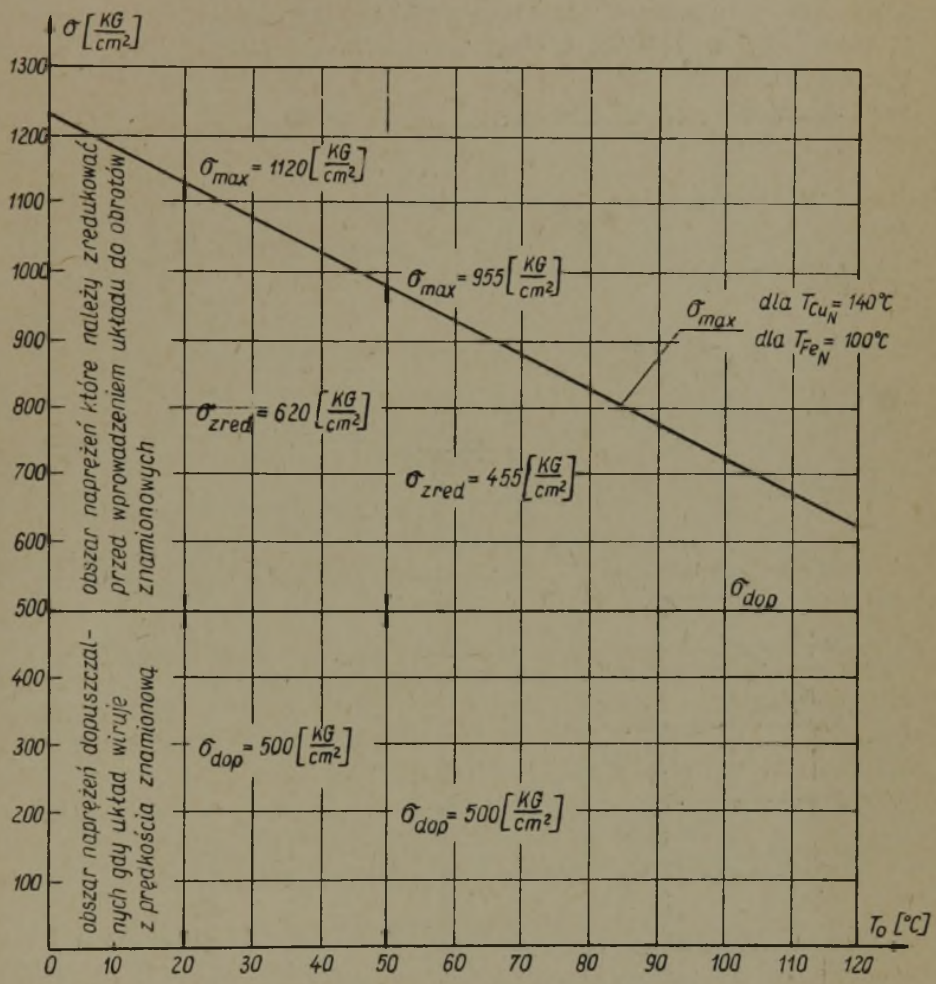
$T_o = 50^o$, $T_{Cu_N} = 140^oC$, $T_{Fe_N} = 100^oC$, $\sigma_{max}=955$ kG/cm^2

Na rys.5 pokazane są maksymalne oraz zredukowane wartości naprężeń dla różnych wyjściowych temperatur początkowych T_o. Im wyższa jest temperatura początkowa układu, tym o mniejszą wartość należy zredukować naprężenie.
Równanie

$$\sigma_{zred} = E_{Cu}\left[\alpha_{Cu}(T_{Cu_x}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe_x}-T_o)\right]$$

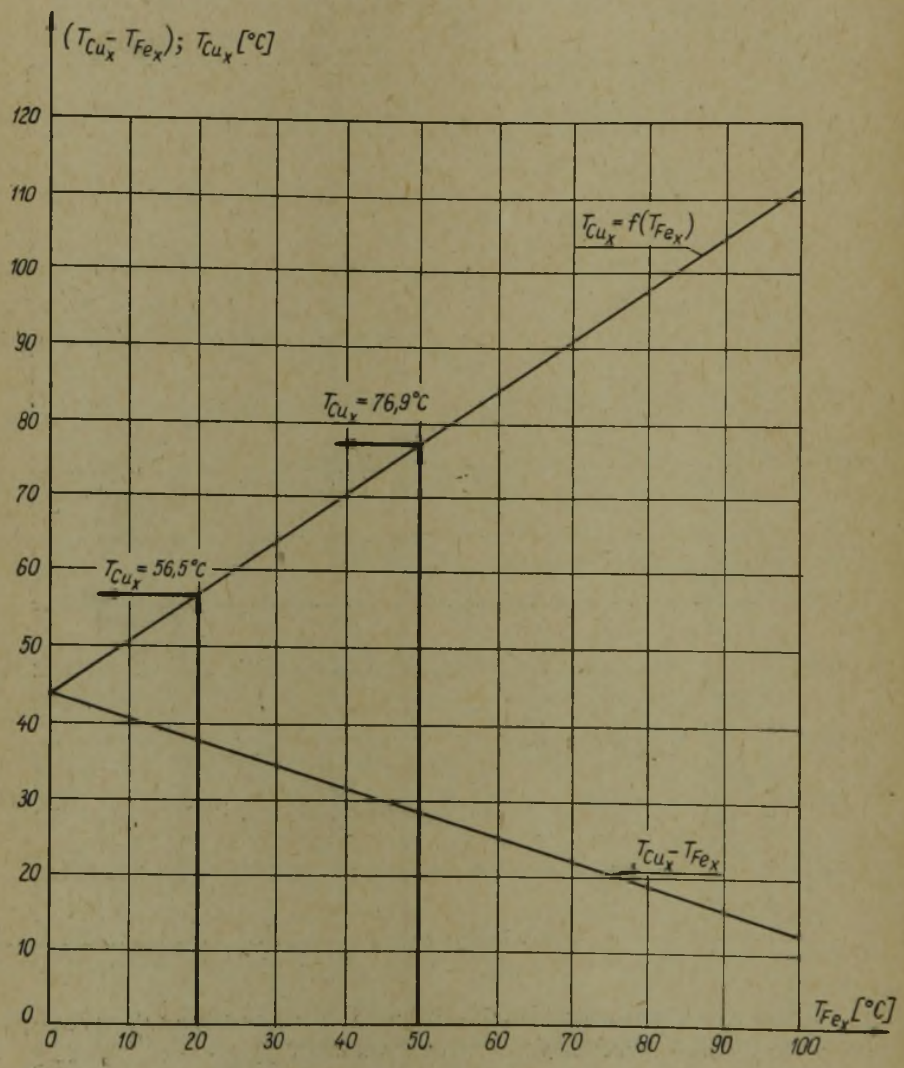
pozwala na obliczenie wartości temperatur do jakich należy wstępnie równocześnie podgrzać pręt miedziany (T_{Cu_x}) oraz obejmę stalową (T_{Fe_x}), gdy układ jest nieruchomy, aby w czasie pracy przy prędkości znamionowej i wymaganych temperaturach w stanie ustalonym $T_{Cu_N} = 140^oC$, $T_{Fe_N} = 100^oC$ naprężenia rzeczywiste w pręcie były równe dopuszczalnym ($\sigma = \sigma_{dop}$). Temperatury wstępnego podgrzania T_{Cu_x}, T_{Fe_x} nie zależą od temperatury początkowej T_o i związane są zależnością

$$T_{Cu_x} - \frac{\alpha_{Fe}}{\alpha_{Cu}} T_{Fe_x} = 43$$



Rys.5. Wykres naprężeń maksymalnych i zredukowanych występujących w pręcie miedzianym w warunkach $T_{Cu_N} = 140^oC$, $T_{Fe_N} = 100^oC$

Wykresy na rys.6 przedstawiają zależność $T_{Cu_x} = f(T_{Fe_x})$ oraz odpowiednie przyrosty $(T_{Cu_x} - T_{Fe_x})$ jakie muszą być stworzone przy wstępnym podgrzewaniu między prętem a obejmą stalową. Odczytajmy z wykresu do jakiej temperatury T_{Cu_x} nale-



Rys.6. Zależność $T_{Cu_x} = f(T_{Fe_x})$ przy wstępnym podgrzewaniu elementów modelu przy zachowaniu w pręcie miedzianym naprężeń dopuszczalnych

ży doprowadzić pręt miedziany od temperatury początkowej wspólnej dla obydwu elementów modelu równej $T_o = 20^oC$, gdy podgrzanie przebiegać będzie np. adiabatycznie, to znaczy $T_{Fe_x} = T_o = 20^oC$. Wtedy $T_{Cu_x} = 56,5^oC$. Gdy podgrzewamy adiabatycznie od temperatury $T_o = 50^oC$, pręt miedziany musi być podgrzany do temperatury $T_{Cu_x} = 76,9^oC$. Jeżeli zaś będziemy chcieli w stanie cieplnie ustalonym zachować przyrost temperatury $T_{Cu_x}-T_{Fe_x}$ równy na przykład 30°, to miedź musimy podgrzać do temperatury $T_{Cu_x} = 70^oC$, a obejmę stalową do temp. $T_{Fe_x} = 40^o$ od wspólnej temperatury początkowej równej $T_o = 20^o$.

Korzystając z poprzednio podanego wzoru $\sigma_{zred} = \sigma_{max} - \sigma_{dop}$ można wyprowadzić ogólną zależność na $T_{Cu_x} = f(T_{Fe_x})$. Podstawiając za $\sigma_{zred} = E_{Cu} \cdot \left[\alpha_{Cu} \cdot (T_{Cu_x}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe_x}-T_o)\right]$ zaś za $\sigma_{max} = E_{Cu} \cdot \left[\alpha_{Cu}(T_{Cu_N}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fe_N}-T_o)\right]$ otrzymamy po przekształceniu

$$T_{Cu_x}-T_o = (T_{Cu_N}-T_o) \cdot \left[1 - \frac{\alpha_{Fe}(T_{Fe_N}-T_{Fe_x})}{\alpha_{Cu}(T_{Cu_N}-T_o)}\right] - \frac{\sigma_{dop}}{E_{Cu} \cdot \alpha_{Cu}}$$

2. Badanie zjawisk cieplno-mechanicznych w wirniku turbogeneratora przy tradycyjnym rozruchu

Poprzedzająca analiza zjawisk cieplno-mechanicznych na modelu może być wykorzystana do śledzenia przebiegu rozruchu turbogeneratora. Wymaga ona jednak poszerzenia i bardziej szczegółowego omówienia.

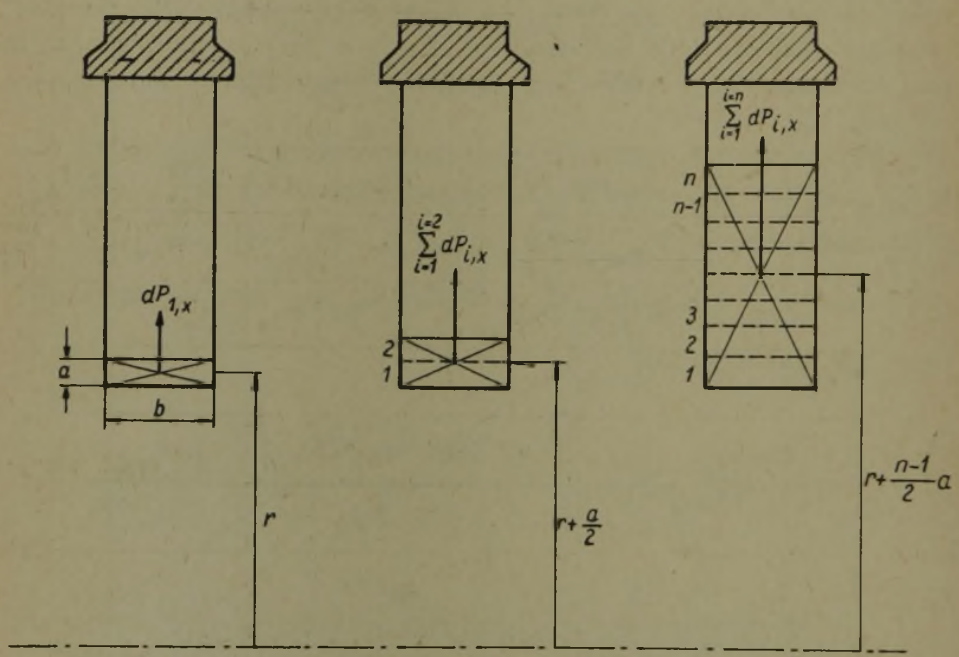
Obliczmy najpierw jakie siły odśrodkowe działają na "n"-ty zwój umieszczony w żłobku wirnika posiadającego prędkość obrotową n_N na długości dx (rys.7).

Na zwój o wskaźniku n = 1, umieszczony na dnie żłobka działa siła odśrodkowa wytworzona własnym ciężarem pręta i wynosi

$$dP_{1x} = \omega^2 \cdot \frac{a \cdot b \cdot \gamma}{g} \cdot r \cdot dx$$

na zwój drugi działają siły odśrodkowe, równe

$$\sum_{i=1}^{i=2} dP_{i,x} = dP_{1,x} + dP_{2,x} = \omega^2 \cdot \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \gamma}{g} \left(r + \frac{a}{2}\right) dx$$



Rys.7. Schemat dla obliczenia sił odśrodkowych

na zwój czwarty działają siły odśrodkowe, równe

$$\sum_{i=1}^{i=4} dP_{i,x} = dP_{1,x} + dP_{2,x} + dP_{3,x} + dP_{4,x} = \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot a \cdot b \cdot \gamma}{g}$$

$$\left(r + \frac{3}{2} a\right) \cdot dx$$

zaś na "n"-ty zwój działają siły odśrodkowe

$$\sum_{i=1}^{i=n} dP_{i,x} = \omega^2 \cdot \frac{n \cdot a \cdot b \cdot \gamma}{g} \left[r + \left(\frac{n-1}{2}\right) a \right] dx$$

a na "n-1" zwój siły odśrodkowe

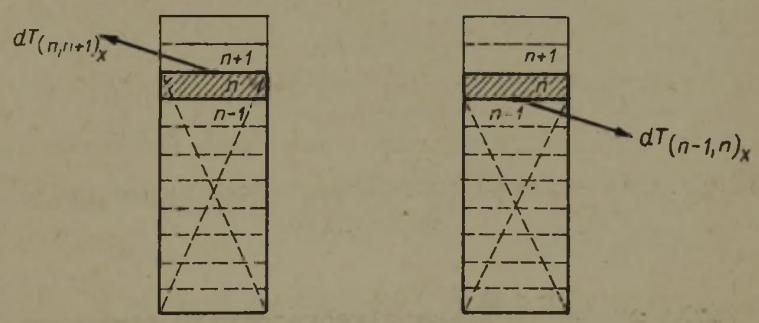
$$\sum_{i=1}^{i=n-1} dP_{i,x} = \omega^2 \frac{(n-1)ab\gamma}{g} \left[r + \left(\frac{n-2}{2}\right) a \right] dx$$

Gdy przewód "n" będzie posiadał możliwość przesuwania się, to na powierzchni styku zwoju "n" ze zwojem "n+1" wystąpi siła tarcia

$$dT_{(n,n+1)_x} = \mu_1 \cdot \omega^2 \cdot \frac{n \cdot a \cdot b \cdot \gamma}{g} \left[r + \left(\frac{n-1}{2}\right) a \right] dx$$

zaś na powierzchni styku zwoju "n-1" ze zwojem "n" siła tarcia

$$dT_{(n-1,n)_x} = \mu_2 \cdot \omega^2 \frac{(n-1) a \cdot b \cdot \gamma}{g} \left[r + \left(\frac{n-2}{2}\right) a \right] \cdot dx$$



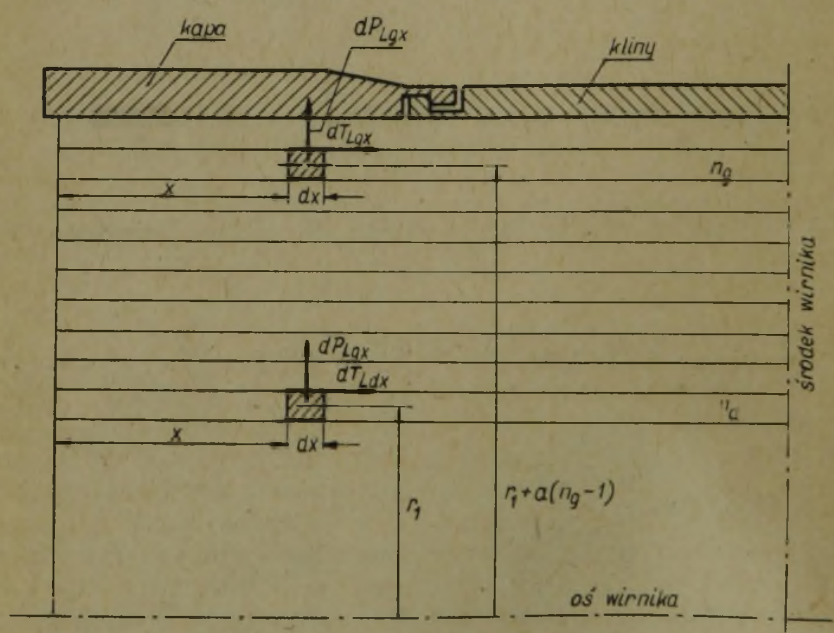
Rys. 8. Schemat dla obliczenia wypadkowej siły tarcia

Przy założeniu równości współczynników tarcia $\mu_1 = \mu_2$ na zwój "n" działać będzie wypadkowa siła tarcia (rys.8)

$$d_{n,x} = dT_{(n,n+1)x} - dT_{(n-1,n)x} =$$

$$= \mu \cdot \omega^2 \frac{n \cdot a \cdot b \cdot \gamma}{g} \left[r + \left(\frac{n-1}{2}\right) a \right] dx -$$

$$- \mu \cdot \omega^2 \frac{(n-1) \cdot a \cdot b \cdot \gamma}{g} \cdot \left[r + \left(\frac{n-2}{2}\right) a \right] \cdot dx$$



Rys.9. Rysunek szkicowy przedstawiający układ prętów w żłobku wirnika

Ostatecznie po przeróbkach algebraicznych otrzymamy

$$dT_{n,x} = \mu \cdot \omega^2 \frac{ab\gamma}{g} \left[r + a(n-1) \right] \cdot dx$$

gdzie $\omega^2 \cdot \frac{ab\gamma}{g}\left[r + a(n-1)\right] \cdot dx$ jak łatwo można wykazać jest elementarną siłą odśrodkową "n"-tego zwoju wytworzoną własnym ciężarem. W dalszych obliczeniach możemy więc wykorzystać zależności wyprowadzone przy uprzednim badaniu zjawisk na modelu (rys.9). I tak, siły tarcia działające na górny i dolny zwój n_g, n_d obliczamy ze wzorów:

$$T_{(Lgx)} = \mu \cdot \omega^2 \frac{ab\gamma}{g}\left[r + a(n_g-1)\right] \cdot L_{gx}$$

$$T_{(Ldx)} = \mu \cdot \omega^2 \frac{ab\gamma}{g}\left[r + a(n_g-1)\right] \cdot L_{dx}$$

zaś naprężenia w górnym i dolnym zwoju według wzorów:

$$\sigma_{(Lgx)} = \frac{T_{(Lgx)}}{a \cdot b} = \mu\omega^2 \cdot \frac{\gamma}{g}\left[r + a(n_g-1)\right] \cdot L_{gx}$$

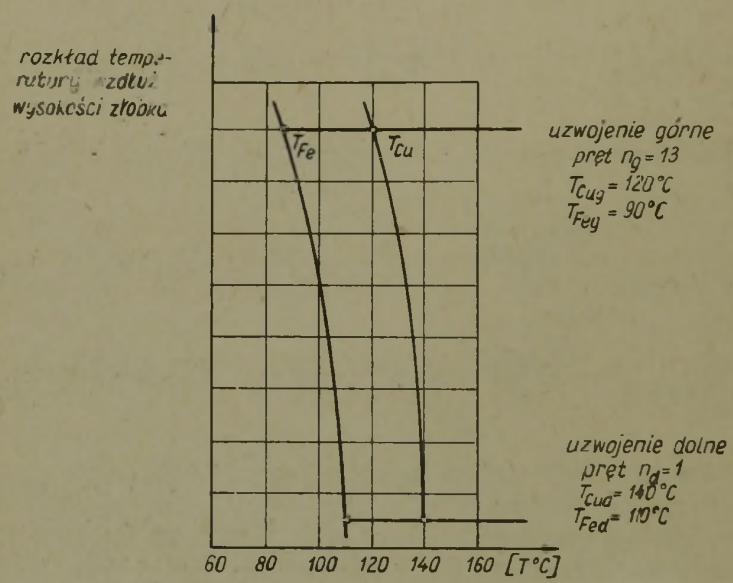
$$\sigma_{(Ldx)} = \frac{T_{(Ldx)}}{a \cdot b} = \mu\omega^2 \cdot \frac{\gamma}{g}\left[r + a(n_d-1)\right] \cdot L_{dx}$$

Rozważmy obecnie jakie zjawiska wystąpią przy tzw. tradycyjnym rozruchu turbogeneratora. Tradycyjny rozruch turbogeneratora polega na doprowadzeniu wirnika do znamionowej prędkości obrotowej i następnie załączeniu prądu wzbudzającego. Po zsynchronizowaniu generatora z siecią następuje stopniowe jego obciążenie. Nagrzanie uzwojeń wzbudzających odbywa się już zatem po osiągnięciu przez wirnik prędkości znamionowej a więc gdy działają siły odśrodkowe i w ich wyniku siły tarcia powstrzymujące wydłużenie się zwoju względem beczki. Wydłużenie to, spowodowane wyższą temperaturą i wyższym współczynnikiem rozszerzalności miedzi niż stali, zatrzymane jest przez siły tarcia jeżeli nie na całej, to na znacznej długości uzwojeń.

Istnieje zatem prawdopodobieństwo powstawania w uzwojeniach naprężeń przewyższających granicę sprężystości miedzi. Przy tradycyjnym zatrzymaniu turbogeneratora, gdy chłodzenie uzwojeń następuje przy niskiej prędkości obrotowej wirnika, z uwagi na brak sił tarcia przeciwstawiających się przesuwaniu uzwojeń, przyjmują one swobodnie nową długość lecz inną

jaką miały przed rozruchem, gdyż wystąpiły w nich odkształcenia trwałe. Prowadzi to do zniekształcenia uzwojeń, uszkodzenia izolacji i ostatecznie do zwarć międzyzwojowych i do ziemi.

Obserwacja zjawisk cieplno-mechanicznych występujących przy tradycyjnym rozruchu i zatrzymaniu turbogeneratora jest w pewnym stopniu analogiczna do tych, które prześledziliśmy uprzednio na modelu.



Rys.10. Rozkład temperatury w pręcie miedzianym i żelazie wirnika w kierunku promieniowym

Rozszerzenie analizy przez przyjęcie zmian w rozkładzie temperatury (rys.10) wzdłuż żłobka i zęba wirnika pozwoli na bardziej szczegółowe prześledzenie i wykazanie przyczyn deformacji uzwojeń w cyklu "rozruch-zatrzymanie". Obliczenia przeprowadzimy dla wirnika chłodzonego powierzchniowo i przyjmujemy w oparciu o źródła zagraniczne, że temperatura miedzi i zęba w stanie cieplnym ustalonym wynoszą:

dla zwoju górnego n_g $T_{Cug} = 120°C$ $T_{Feg} = 90°C$

dolnego n_d $T_{Cud} = 140°C$ $T_{Fed} = 110°C$

Załóżmy jak poprzednio, że na nieznanej jeszcze długości $L-2L_{gx_2}$, $L-2L_{dx_2}$ pręty n_g i n_d będą unieruchomione. W tym obszarze wystąpią więc warunki zgodności odkształceń

$$(L-2L_{gx_2}) \cdot \left[\alpha_{Cu}(T_{Cug}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Feg}-T_o)\right] = \frac{T_{(Lgx_2)} \cdot (L-2L_{gx_2})}{E_{Cu} \cdot F}$$

oraz $(L-2L_{dx_2}) \cdot \left[\alpha_{Cu}(T_{Cud}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fed}-T_o)\right] =$

$$= \frac{T_{(Lgx_2)} \cdot (L-2Ldx_2)}{E_{Cu} \cdot F}$$ a dalej $\alpha_{Cu}(T_{Cug}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Feg}-T_o) =$

$$= \frac{T_{(Lgx_2)}}{E_{Cu} \cdot F}, \quad \alpha_{Cu}(T_{Cud}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fed}-T_o) = \frac{T_{(Ldx_2)}}{E_{Cu} \cdot F}.$$

Wykorzystując poprzednie zależności możemy obliczyć długości L_{gx_2}, L_{dx_2} na których pręty n_g i n_d mogą się przesuwać

$$L_{gx_2} = \frac{E_{Cu} \cdot F\left[\alpha_{Cu}(T_{Cug}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Feg}-T_o)\right]}{\mu \cdot \omega^2 \frac{a \cdot b \cdot \gamma}{g}\left[r + a(n_g-1)\right]} =$$

$$= \frac{E_{Cu}\left[\alpha_{Cu}(T_{Cug}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Feg}-T_o)\right]}{\mu \cdot \omega^2 \frac{\gamma}{g}\left[r + a(n_g-1)\right]}$$

$$L_{dx_2} = \frac{E_{Cu} \cdot F\left[\alpha_{Cu}(T_{Cud}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fed}-T_o)\right]}{\mu \cdot \omega^2 \cdot \frac{a \cdot b \cdot \gamma}{g} \cdot \left[r + a(n_d-1)\right]} =$$

$$= \frac{E_{Cu}\left[\alpha_{Cu}(T_{Cud}-T_o) - \alpha_{Fe}(T_{Fed}-T_o)\right]}{\mu \cdot \omega^2 \cdot \frac{\gamma}{g}\left[r + a(n_d-1)\right]}$$

z tym, że na długości

$$L_{gx_1} = \frac{\sigma_{dop}}{\mu \cdot \omega^2 \cdot \frac{\gamma}{g}\left[r+a\cdot(n_g-1)\right]}$$

$$L_{dx_1} = \frac{\sigma_{dop}}{\mu \cdot \omega^2 \cdot \frac{\gamma}{g}\left[r+a(n_d-1)\right]}$$

przesunięcie prętów odbywać się będzie swobodnie bez powstania w miedzi trwałych odkształceń. Na długości $L-2L_{gx_2}$, $L-2L_{dx_2}$ pręty będą unieruchomione.

Na rys.11 przedstawiono rozkład naprężeń działających na poszczególnych odcinkach pręta górnego n_g i dolnego n_d. Obliczenia zostały wykonane dla zwoju $n_g=13$, $n_d=1$ wirnika turbogeneratora o długości $L = 500$ [cm] $n_N = 3000$ [obr/min.] Wymiary izolowanego pręta $a = 0,8$ [cm], $b = 2,8$ [cm] $r = 37$ [cm]

$\sigma_{dop} = 500 \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$ $\quad L_{gx_1} = 60$ [cm]

$\sigma_{ciepln_g} = 895 \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$ $\quad L_{dx_1} = 75,8$ [cm]

$\sigma_{ciepln_d} = 1005 \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$ $\quad L_{gx_2} = 107,2$ [cm]

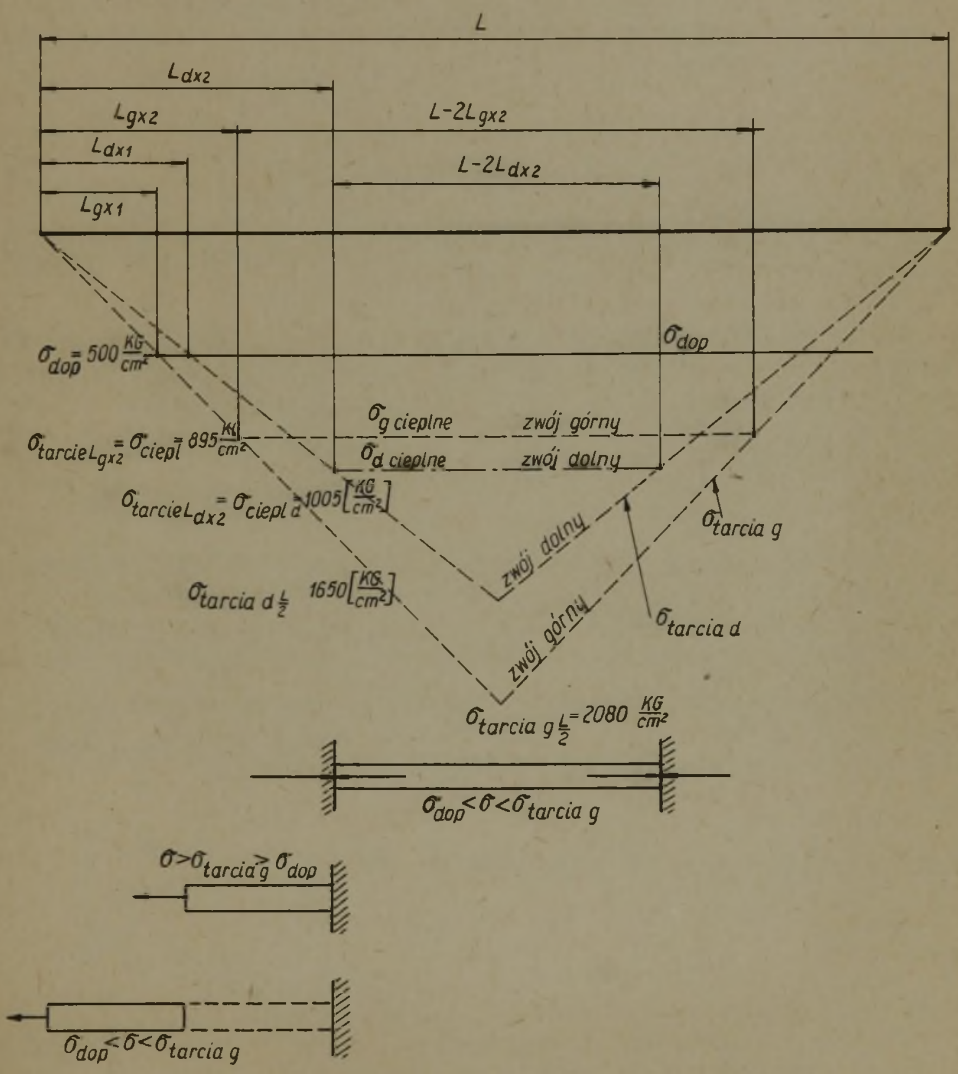
$\sigma_{tarcia_d} = 1650 \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$ $\quad L_{dx_2} = 159,0$ [cm]

$\sigma_{tarcia_g} = 2080 \left[\frac{kG}{cm^2}\right]$

Temperatura początkowa układu $T_0 = 20^\circ C$. Powiązanie otrzymanych wartości naprężeń z wykresem $\sigma = f(\varepsilon)$ dla miedzi pozwala przypuszczać, że trwałe skrócenia pręta dolnego będą większe niż górnego i w wyniku czego nastąpi częściowe

wciągnięcie czołowych części uzwojeń leżących bliżej osi wirnika w strefę żłobkową.

Przedstawiona analiza zjawisk cieplno-mechanicznych występujących w wirniku turbogeneratora w cyklu eksploatacyjnym rozruch - zatrzymanie daje zadowalające jakościowe wyjaśnienie zjawiska deformacji uzwojeń, którego ilościowe sprawdze-



Rys.11. Rozkład sił i naprężeń działających na pręt górny i dolny uzwojenia wirnika

nie jest bardziej złożone. Niepoślednią rolę odgrywać tutaj będzie trudność w określeniu rozkładu temperatur w beczce wirnika w stanie cieplnie nieustalonym jaki występuje przy rozruchu i zatrzymaniu. Poza tym własności miedzi w trakcie częstych rozruchów i zatrzymań ulegają zmianie. Miedź utwardza się i zmiękcza. Występują w niej również zjawiska relaksacji i pełzania. Obserwowane skrócenia się beczki gdy wirnik posiada wysoką prędkość obrotową, wywołane znacznymi naprężeniami stycznymi i promieniowymi starającymi się powiększyć jego średnicę powodują wzrost efektu cieplnego wydłużenia się zwojów.

3. Zapobieganie

Z najważniejszych eksploatacyjnych środków zapobiegających powstawaniu uszkodzeń wirników turbogeneratorów należy wymienić:

a) podgrzewanie uzwojeń wirnika prądem z wzbudnicy rezerwowej przy obniżonych obrotach a mianowicie dużym prądem w krótkim okresie czasu (podgrzewanie adiabatyczne),

b) ocieplanie, polegające na ogrzewaniu przy obniżonych obrotach zarówno uzwojeń jak i beczki wirnika w sposób powolny,

c) zimny rozruch - zimne zatrzymanie, sposób polegający na chłodzeniu turbogeneratora po odłączeniu go od sieci przy obrotach znamionowych, aż do osiągnięcia temperatury zbliżonej do temperatury początkowej przed rozruchem.

Do środków konstrukcyjnych zaliczyć trzeba przede wszystkim wykonywanie uzwojeń ze stopów miedzi ze srebrem, które posiadają znacznie wyższą granicę sprężystości.

Rękopis złożono w redakcji w marcu 1963 r.

LITERATURA

[1] W. L a t e k: Naprężenia termiczne w uzwojeniach wirników turbogeneratorów. Archiwum Elektrotechniki z.2 t.X/ 1961.

[2] W. L a t e k, R. M a t u s i a k, J. P r z y b y s z: Metoda określania parametrów rozruchu turbogeneratorów. Energetyka Nr 10 1961.

[3] W.J. G i b s o n - H.D. T a y l o r: Field preheating for large turbine generators. AIEE Transactions Part III B r. 1954.

[4] E.G. K ó m a r: Woprosy projektirowanija turbogeneratorow. Gosenergoizdat Moskwa-Leningrad 1955.

[5] M.M. B i e l a j e w: Wytrzymałość materiałów. WMON 1954.

ОБРАЗОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБМОТОК В БОЛЬШИХ РОТОРАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

При эксплуатации больших синхронных турбогенераторов встречаются повреждения изоляции, вызванные деформациями возбуждающей обмотки. В общем считается, что причиной этого является консервативно производимый пуск. Статья имеет целью пояснение тепло-механических явлений, выступающих при консервативно проводимом пуске и рассмотрение способов, предупреждающих постоянные повреждения возбуждающих обмоток.

CAUSES DES DÉFAUTS DANS LES GRANDS ROTORS DES TURBO-GÉNÉRATEURS SYNCHRONES

En exploitation des grands turbo-générateurs synchrones il arrivent les défauts de l'isolation causés par la déformation des enroulements excitateurs. En général on attribue ces avaries aux démarrages effectués traditionnellement, le but de cet article c'est d'éclairer les phénomènes thermomécaniques qui se produisent pendant le démarrage traditionnel et de discuter les moyens qui pourraient prevenir les mis hors de service des enroulements excitateurs.