

HENRYK KOWALOWSKI

Katedra Maszyn Elektrycznych

SIŁY ELEKTRODYNAMICZNE OBCIĄŻAJĄCE UZWOJENIA TWORNIKÓW  
MASZYN SYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W pracy zwrócono uwagę na rozbieżności w poglądach dotyczących programu prób zwarciovych przeprowadzonych przed oddaniem maszyny do eksploatacji. Wiąże się to z potrzebą teoretycznego i doświadczalnego opracowania szeregu zagadnień dotyczących powstawania sił elektrodynamicznych (sed) obciążających uzwojenia maszyny w warunkach ruchowych. W związku z tym podjęto próbę analitycznego ujęcia części zjawiska w oparciu o ogólne prawo oddziaływania obwodów z prądami. Rozpatruje się mechanizm powstawania sed w przestrzeni i w czasie otrzymując przy tym wnioski posiadające ważne znaczenie praktyczne, dotyczące powstawania drgań i odkształceń spowodowanych tymi sed.

Uzyskanie niezawodnej pracy prądnic synchronicznych, w szczególności wielkich, mocy, wymaga rozwiązania szeregu zagadnień, wśród których poważną grupę stanowią problemy związane z poznaniem i opanowaniem mechanicznych naprężeń występujących w elementach konstrukcyjnych oraz w uzwojeniach tych maszyn.

Źródłem najistotniejszych naprężeń mechanicznych są:

- a) magnetyczne naciągi pomiędzy stojanem i wirnikiem,
- b) elektromagnetyczne momenty obrotowe,
- c) siły pochodzące od deformacji cieplnych, oraz
- d) siły elektrodynamiczne (sed) w uzwojeniach maszyny.

W rezultacie działania tych sił i momentów w maszynie pojawiają się drgania i odkształcenia, przy czym mogą występować zarówno drgania całej prądnicy względem fundamentów jak

również drgania poszczególnych elementów maszyny z jednoczesnym ich odkształcaniem.

Zagadnienie sił elektrodynamicznych (sed) pojawiających się w uzwojeniach stojanów prądnic, a także problem wykonania niezawodnych mocowań połączeń czołowych tych uzwojeń nabiera poważniejszego znaczenia w związku z produkcją generatorów z forsownym bezpośrednim chłodzeniem, gdzie sed w uzwojeniach osiąga wartości znacznie wyższe niż miało to miejsce w maszynach z tradycyjnym systemem chłodzenia. Postęp idący w kierunku znacznego zwiększenia stopnia wykorzystania aktywnej objętości maszyny i towarzyszący mu wzrost mocy w jednostce związany jest z istotnym powiększeniem okładu prądowego w turbogeneratorach z bezpośrednim chłodzeniem uzwojeń (okład prądowy powiększył się od ok. 1400 A/cm do 1800 A/cm, a indukcja magnetyczna w szczelinie od 6500 do 8500 Gausów).

Tak duże nagromadzenie energii elektromagnetycznej w stosunkowo niedużej objętości maszyny jest przyczyną występowania, w jej uzwojeniach, poważnych naprężeń mechanicznych już przy pracy znamionowej, do której należy obecnie zaliczyć także często stosowaną pracę asynchroniczną automatyczną resynchronizację maszyny, która poprzednio wypadła z synchronizmu, a także włączanie do pracy równoległej sposobem samosynchronizacji. Przy różnego rodzaju zwarcjach wewnętrznych i zewnętrznych, które w niekorzystnych przypadkach mogą trwać do kilku sekund, uzwojenia maszyny muszą już znosić bardzo duże obciążenia mechaniczne wywołane przez sed od znacznych wartości prądów zwarciovych.

Na szkodliwe działanie sed najbardziej narażone są połączenia czołowe uzwojeń stojanów. Odpowiednie zabezpieczenie połączeń czołowych przeciwko trwałym odkształceniom i przeciwko szkodliwym drganiom stanowi dla konstruktorów tych maszyn bardzo trudne zadanie. Rozwiązanie tego zadania związane jest z umiejętnością analitycznego ujęcia zjawisk powstawania sed i wyciągnięcia właściwych wniosków z tej analizy. Zapewnienie niezawodnej pracy maszyny z tego punktu widzenia nie może bowiem prowadzić do przewymiarowania układu mocowań połączeń czołowych, co może mieć dodatkowo bezpośredni związek z pogorszeniem się stopnia odprowadzania ciepła z tej przestrzeni maszyny. Zbyt oszczędne i nieprze-myślane rozwiązanie usztywnień połączeń czołowych prowadzi znów najczęściej do wczesnych uszkodzeń uzwojeń, przy czym będą to zwykle cięższe przypadki uszkodzeń powodujące dłuższe przestoje eksploatacyjne maszyny, gdyż związane są z koniecznością przewinięcia części lub całego jej uzwojenia.



Ponieważ wymaganie dostatecznego usztywnienia połączeń czołowych idzie w parze z zagwarantowaniem pewnej pracy maszyny w warunkach eksploatacyjnych maszyny, normy poszczególnych krajów odnoszące się do maszyn elektrycznych przewidują odpowiednie przepisy jakie powinna spełniać każda nowo wyprodukowana maszyna z uwagi na wytrzymałość przy zwarciach udarowych.

Polska norma na maszyny elektryczne - PN-55/E-06000 w p-cie 2.13 stwierdza:

"Maszyny synchroniczne powinny wytrzymywać działanie udarowego prądu występującego przy zwarciu ich zacisków przy biegu jałowym, znamionowej prędkości obrotowej i napięciu równym 105% napięcia znamionowego. Wartość udarowego prądu zwarcia symetrycznego maszyny synchronicznej nie powinna w tych warunkach przekraczać 15-krotnej amplitudy prądu znamionowego".

Zgodnie z radziecką normą GOST 183-41 na maszyny elektryczne, w rozdziale IX poz.95 wskazuje się, że w celu sprawdzenia wystarczającej wytrzymałości mechanicznej maszyny i zapewnienia niezawodnej pracy w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, w których mogą występować obciążenia udarowe należy (par.99) przeprowadzić badania maszyn synchronicznych na udarowy prąd zwarcia. Maszyny synchroniczne powinny wytrzymać próbę wytrzymałości swej konstrukcji na udarowy prąd zwarcia (zwarcie na zaciskach), przy biegu jałowym prądnicy, przy znamionowej prędkości obrotowej i przy napięciu równym 105% napięcia znamionowego.

Niemieckie normy VDE 0530 przewidują, że z uwagi na wytrzymałość zwarciovą, przy 5%-wym podwyższeniu napięcia, prąd udarowy przy zwarciu na zaciskach nie powinien być większy od  $\sqrt{2.15}$ -krotnej wartości prądu znamionowego maszyny.

Norma USA ASA C50-1953 precyzuje badania zwarciovowe w następujący sposób: Prądnice synchroniczne powinny wytrzymać w przeciągu 10 sek. 3-fazowy udarowy prąd przy zwarciu na zaciskach maszyny, gdy prądnica jest obciążona mocą znamionową, przy znamionowym współczynniku mocy i przy napięciu podwyższonym o 5%. Nieco starsza norma - ASA C50-1936 zalecała badanie maszyny przy 30-sekundowym zwarciu zaistniałym przy biegu jałowym z częstotliwością znamionową i przy 10%-wej podwyżce napięcia. Takie badanie dopuszczano się tylko dla nowo wykonanych maszyn.

W normie brytyjskiej BS 225 p.36 zaleca się przeprowadzanie prób zwarciovych tylko na wyraźne wymaganie takiej próby przez zamawiającego prądnicę. Także ewentualny program prób

zwarciovych ma być formułowany od przypadku do przypadku, przy okazji precyzowania warunków technicznych zamówienia.

Jak wynika z podanych informacji zaczerpniętych z norm na maszyny elektryczne różnych krajów, nie ma jednolitego poglądu nie tylko na program ale nawet na konieczność przeprowadzania sprawdzających prób zwarciovych przed oddaniem maszyny do eksploatacji.

Problemy te są obecnie dyskutowane przez zainteresowane czynniki szeregu krajów produkujących maszyny synchroniczne wielkich mocy i w Polsce. Nim jednak i u nas zapadną ostateczne decyzje w tych sprawach, zagadnienie sed powinno być możliwie wszechstronnie opracowane, zarówno od strony ilościowej jak i jakościowej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie niektórych aspektów zagadnienia dotyczącego powstawania sed na połączeniach czołowych uzwojeń stojanów maszyn synchronicznych. Podjęto także próbę prostego analitycznego ujęcia zjawiska oraz wynikających przy tym trudności.

Siłami elektromagnetycznymi lub siłami elektrodynamicznymi nazywamy te siły mechaniczne, których występowanie stwierdza się doświadczalnie przy obserwacjach przewodników z prądami, znajdujących się w polu magnetycznym. Sed pojawiają się nie tylko w obwodach z prądem położonych w polu ale i wtedy, gdy mamy do czynienia z pojedynczym obwodem a pole wokół tego obwodu określone jest przez prąd tego samego obwodu. Do tej grupy sed należy także zaliczyć siły mechaniczne działające na znajdujące się w polu magnetycznym ciała z materiału ferromagnetycznego. W istocie rzeczy i w tym przypadku mamy bowiem do czynienia z siłami mechanicznymi działającymi na prądy elektryczne w polu magnetycznym, są to jednak prądy elementarne, które istnieją w każdym materiale ferromagnetycznym.

Mówiąc więc o sed rozumiemy, że możemy tu mieć do czynienia z:

- a) siłami od współdziałania obwodów z prądami,
- b) siłami pojawiającymi się w pojedynczym obwodzie z prądem,
- c) siłami wzajemnego odpychania i przyciągania magnesów,
- d) siłami oddziaływania prądów i magnesów,
- e) siłami przyciągania ciał ferromagnetycznych do magnesów i do obwodów z prądami.



W niniejszym opracowaniu będziemy określać sed działające na połączenia czołowe uzwojeń twornika prądnic synchronicznych biorąc za podstawę analizy prawo o wzajemnym oddziaływaniu obwodów z prądami. Prawo to wyprowadza się z ogólnego wyrażenia dla sed, które można zapisać w formie:

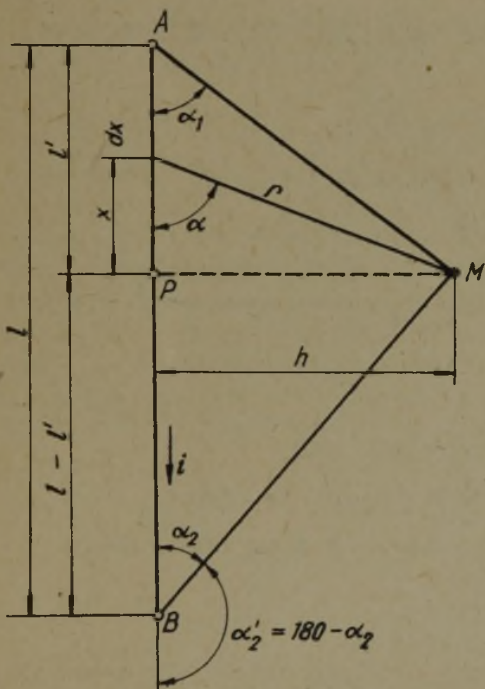
$$\vec{F} = i [\vec{B} \vec{l}], \quad (1)$$

a które brzmi: sed  $F$  działająca na przewodnik z prądem  $i$  znajdujący się w polu o indukcji  $\vec{B}$  równa się iloczynowi wektorowemu z wektora indukcji  $\vec{B}$  i długości  $\vec{l}$  przewodnika poddanego działaniu tej siły, pomnożonemu przez wartość prądu  $i$  (pod wektorem  $\vec{l}$  rozumiemy tu wektor, równy co do wartości długości przewodnika, a co do kierunku zgodny z kierunkiem płynącego w nim prądu).

Przy obliczaniu sed największej trudności sprawia zwykle określenie indukcji  $\vec{B}$  (jeżeli oczywiście z góry nie mamy danej wartości).

Rozpatrując punkt  $M$  i prostoliniowy przewodnik długości  $l$  o przekroju kołowym z prądem  $i$ , zajmujący względem tego punktu dowolne położenie (rys.1) znajdziemy na początku, przy pomocy prawa Bio-Savarta - Laplace'a, elementarną składową natężenia pola magnetycznego w punkcie  $M$  od elementu  $dx$  o prądzie  $i$ :

$$dH = \frac{i}{4\pi} \frac{dx \sin\alpha}{r^2} \quad (2)$$



Rys.1. Do obliczenia  $H$  w punkcie  $M$

Ponieważ:

$$x = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha},$$

$$dx = - \frac{h}{\sin^2 \alpha} d\alpha,$$

$$r = \frac{h}{\sin \alpha},$$

stąd:

$$dH = - \frac{i}{4\pi} \frac{1}{h} \sin \alpha d\alpha$$

Całkując wartość  $H$  w granicach odcinków AP i PB oraz sumując te wyrazy otrzymamy:

$$\begin{aligned} H &= \frac{i}{4\pi h} \left[ \int_{\alpha_1}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha \right] = \\ &= \frac{i}{4\pi} \frac{(\cos \alpha_1 - \cos \alpha'_2)}{h} = \frac{i}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{h} \quad (3) \end{aligned}$$

gdzie:

$\alpha_1, \alpha_2$  - kąty wewnętrzne trójkąta MAB

$\alpha'_2 = \pi - \alpha_2$  - zewnętrzny kąt uzupełniający do kąta.

W układzie MKS dla powietrza:  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  zatem:

$$B = \mu_0 H = 4\pi 10^{-7} H, \quad (4)$$

Po uwzględnieniu  $r$  (3) otrzymamy więc:

$$B = i \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{h} 10^{-7} \left[ \text{Wb/m}^2 \right] \quad (5)$$

Mając znaną indukcję w punkcie M możemy już określić siłę od przewodnika AB na element  $dl_1$  będący w pobliżu punktu M, leżący w płaszczyźnie trójkąta ABM i obciążony prądem  $i_1$  z następującej relacji (współdziałający prąd w przewodniku AB oznaczyliśmy w tym przypadku przez  $i_2$ ):

$$dF_{12} = i_1 dl_1 B = i_1 i_2 \frac{dl_1 (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)}{h} 10^{-7} \text{ [N]} \quad (6)$$

Ponieważ:  $1 \text{ [Newton]} = \frac{1}{9,81} \text{ [kG]} = 1,02 \cdot 10^{-1} \text{ [kG]}$ ,

zatem:

$$dF_{12} = 1,02 i_1 i_2 10^{-8} \frac{(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) dl_1}{h} \text{ [kG]} \quad (7)$$

Pierwszy człon wyrażenia (7) -  $1,02 i_1 i_2 10^{-8}$  - zależy od wartości prądów, drugi zaś

$$\frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{h} dl_1 \quad (8)$$

zależy tylko od wzajemnego geometrycznego usytuowania elementu  $dl_1$  i przewodnika  $l_2$ , przedstawiając sobą wielkość bezwymiarową. Wyrażenie (8) nazwano współczynnikiem konfiguracji siły -  $k_{12}$ , przy czym wyrażono go w formie różniczkowej ( $dk_{12}$ ). Dla skończonych wartości długości przewodu  $l_1$  znajdującego się pod działaniem pola od prądu przewodu  $l_2$ , współczynnik konfiguracji obliczymy z zależności

$$k_{12} = \int_0^{l_1} dk_{12} = \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{h_x} dx \quad (9)$$

gdzie:

$h_x$  - prostopadła do przewodnika  $l_2$  z pewnego punktu położonego na  $l_1$ .



Rozpatrując wyrażenie dla współczynnika konfiguracji sed dochodzimy do praktycznie ważnego wniosku, że współczynniki konfiguracji dwóch par dowolnie względem siebie położonych przewodników o podobnych kształtach, różniących się jednak rozmiarami, są sobie równe. Ta teza, którą można nazwać prawem lub kryterium podobieństwa geometrycznego może znacznie ułatwić rozwiązanie szeregu zadań związanych z określeniem sed. Można bowiem prowadzić obliczenia i wyciągać wnioski niezależnie od skal rozpatrywanych obiektów. Teza o kryterium podobieństwa geometrycznego w zastosowaniu do zjawisk powstawania sed pozwala na prowadzenie doświadczalnych badań i pomiarów sed na modelach podobnych geometrycznie do obiektu oryginalnego - będącego przedmiotem badań.

Z wyrażenia dla współczynnika konfiguracji sed, napisanego w formie różniczkowej:

$$dk_{12} = \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{h_x} dl_1 \quad (10)$$

lub

$$\frac{dk_{12}}{dl_1} = \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{h_x} \quad (11)$$

można wprowadzić formuły dla współczynnika konfiguracji sed pewnego elementu długości przewodnika od nieskończonego długiego przewodnika działającego na ten element.

W tym przypadku kąty  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  będą dążyć do zera, a wartości  $\cos\alpha_1$  i  $\cos\alpha_2$  - do jedności, a

$$\frac{dk_{12}}{dl_1} = \frac{2}{h_x} \quad (12)$$

Wyrażenie (12) będące pochodną współczynnika konfiguracji względem długości przewodnika można by nazwać współczynnikiem konfiguracji jednostkowego obciążenia sed w danym punkcie.



Dla skończenie długiego przewodnika  $l_1$  równoległego do nieskończenie długiego przewodu  $l_2$  oddalonego od  $l_1$  o "a" (rys.2) otrzymamy:

$$\frac{dk_{12}}{dl_1} = \frac{2}{a}, \quad (13)$$

oraz

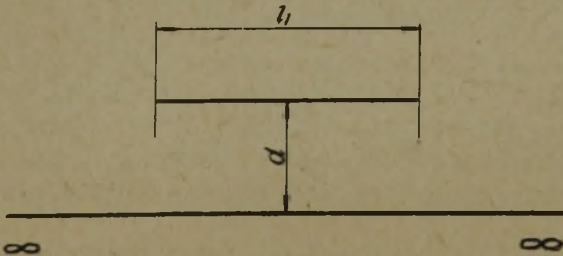
$$k_{12} = \frac{2l_1}{a}. \quad (14)$$

W tych warunkach wyrażenie dla sed pomiędzy dwoma równoległymi przewodami o długości  $l$  (rys.3) oddalonymi od siebie o "a" wyniesie:

$$\begin{aligned} F_{12} &= 1,02 \frac{i_1 [\text{kA}]}{10} \cdot \frac{i_2 [\text{kA}]}{10} k_{12} = \\ &= 2,04 \frac{i_1 [\text{kA}]}{10} \frac{i_2 [\text{kA}]}{10} \frac{l}{a} [\text{kG}] \end{aligned} \quad (15)$$

lub na jednostkę długości:

$$f_{12} = 2,04 \frac{i_1 [\text{kA}]}{10} \frac{i_2 [\text{kA}]}{10} \frac{1}{a} [\text{kG/cm}] \quad (15a)$$



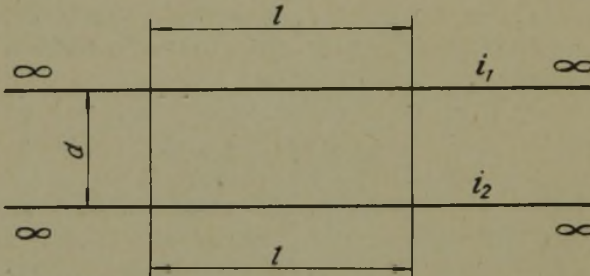
Rys.2. Do obliczenia sed dwóch przewodów

Dla przypadku równych wartości prądów ( $i_1 = i_2$ ):

$$F_{12} = 2,04 \cdot \left(\frac{i \text{ [kA]}}{10}\right)^2 \frac{1}{a} \text{ [kG]} \quad (16)$$

lub na jednostkę długości:

$$f_{12} = 2,04 \cdot \left(\frac{i \text{ [kA]}}{10}\right)^2 \frac{1}{a} \text{ [kG/cm]}. \quad (16a)$$



Rys.3. Do obliczenia sed dwóch prętów

Przy obliczaniu tą metodą dowolnie usytuowanych przewodów z prądem, podstawowym zadaniem będzie określenie współczynników konfiguracji, a potem wyrażenie na sed otrzymamy przez pomnożenie znalezionej  $k_{12}$  przez odpowiednie wartości prądów.

W interesującym nas przypadku sed działających w obszarze połączeń czołowych uzwojeń maszyn synchronicznych nie możemy korzystać w całej rozciągłości z wyrażen podanych w równaniach (15) i (16), które otrzymaliśmy rozpatrując przypadek dwóch liniowych przewodników, nieskończenie długich bez określonej formy przekroju poprzecznego. Jednak przez wprowadzenie do tych formuł pewnych współczynników poprawkowych można dojść do wzorów nadających się w określonych przypadkach do przeprowadzenia interesujących nas praktycznych obliczeń.

Skończoną wartość przekroju i formy pręta można uwzględnić wprowadzając za H.B.Dwightem (lit.4) pewien współczyn-



nik kształtu  $v$ , który będzie przyjmował różne wartości w zależności od stosunków pomiędzy szerokością i wysokością oddziaływujących na siebie prętów. Przebieg  $v = f(x)$  przedstawia rys.4.

Po uwzględnieniu skończonych wielkości przekrojów prętów wzór dla jednostkowej  $sed$  przyjmie postać:

$$f_{12} = 2,04 \cdot i_1 [A] \cdot i_2 [A] \frac{v}{a [cm]} \cdot 10^{-8} [kG/cm]. \quad (17)$$

W przypadku współczesnych turboprądnic synchronicznych zastosowano obecnie prawie wyłącznie koszykowy sposób wykonania połączeń czołowych. W takich uzwojeniach pręty w części czołowej leżą zawsze w dwóch warstwach nad sobą, niezależnie od tego w ilu warstwach zostały one ułożone w żłobkach.

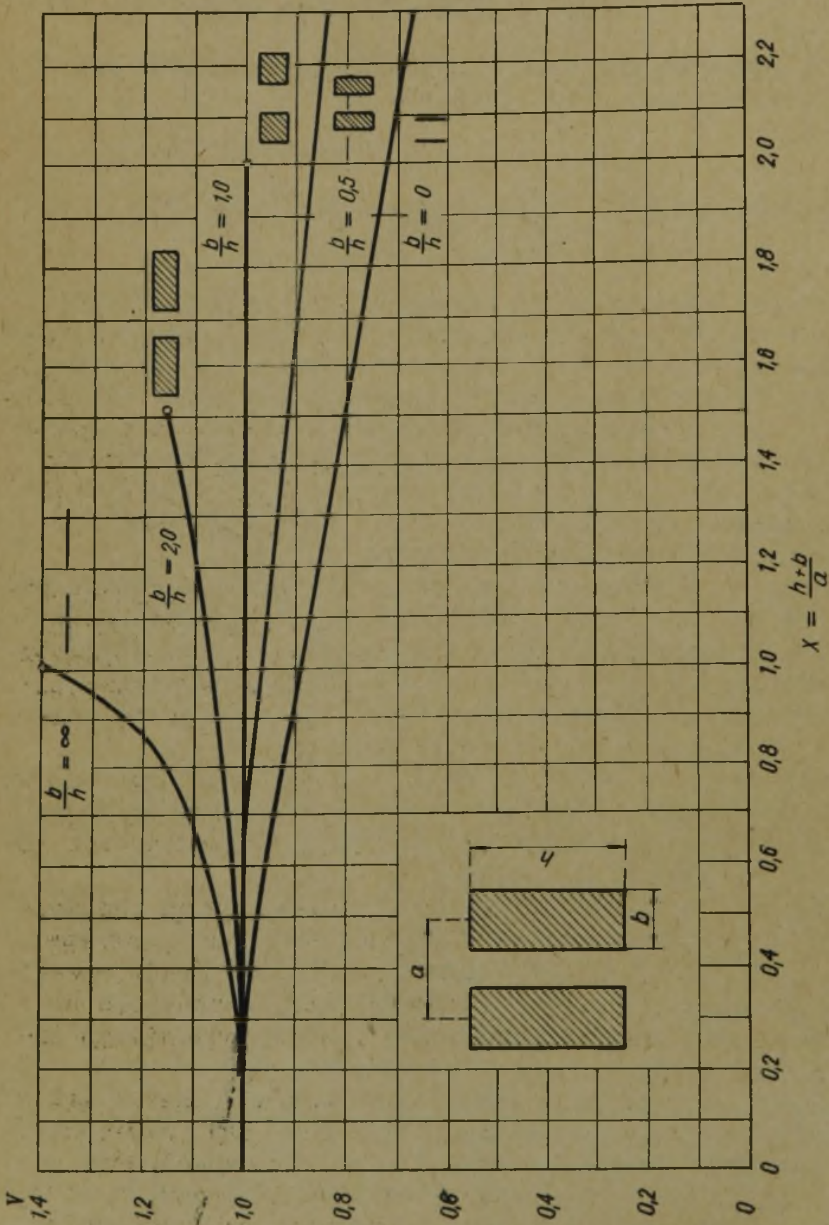
Wewnątrz poszczególnych warstw połączeń czołowych pręty uzwojeń przebiegają wzajemnie do siebie równolegle. Pozwala to nam na zastosowanie równania (17) do obliczeń  $sed$  od prądów płynących w tych połączeniach.

Pominiemy tu więc efekt brzegowy wynikający ze skończonej długości prętów, prowadząc obliczenia zgodnie z następującą regułą: "dwa równoległe pręty o skończonej długości oddziałują na siebie z siłą  $f_{12}$  kG/cm tak długo dopóki przebiegają one równolegle obok siebie; jeżeli jeden z prętów odchyli się od drugiego ustanie działanie siły".

Przy obliczaniu  $sed$  działającej na dany pręt połączenia czołowego musimy uwzględnić nie tylko wpływ pręta leżącego bezpośrednio obok, ale także oddziaływania innych prętów leżących w jego dalszym sąsiedztwie.

Sposób prowadzenia obliczeń  $sed$  z uwagi na tę okoliczność, przy uwzględnieniu prądów w granicach jednej warstwy pokażemy na przykładzie trójfazowego uzwojenia średnicowego z trzema żłobkami na biegun i fazę (rys.5). Zaznaczone na rysunku grotty pokazują kierunkowość prądu w dodatnim maksimum odpowiedniej fazy.

Z ogólnego rozpatrzenia przebiegów prądów w czasie całego okresu wnioskujemy, że największe wartości  $sed$  występować będą w skrajnych prętach każdej fazy a w szczególności w przypadku gdy prąd skrajnego pręta sąsiedniej fazy przechodzi przez zero. Taki rozkład prądowy występuje przy powstaniu zwarcia dwubiegunowego. Właśnie dla analizy  $sed$ , w przypadku połączeń prętów jak na rys.5, założymy, że jest taki rozptył prądów, przy czym niechaj bezprądową fazą będzie faza III.



Rys.4



Wtedy w leżących obok siebie strefach fazy I i II będą płynąć prądy takie same co do wartości i kierunku. Sześć leżących obok siebie prętów fazy I i II będą się wzajemnie przyciągać. Przyjmijmy za dodatnie te siły, które będą działać zgodnie z kierunkiem zaznaczonym na rys.5.

Stosując zasadę superpozycji sed otrzymamy:

a) sed działającą na końcowy pręt fazy II w punkcie 1 od pięciu pozostałych prętów fazy II i I w formie:

$$f_1 = 2,04 \cdot i^2 \frac{10^{-8}}{a} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}\right) = f_0 \cdot W_1 \text{ [kg/cm]} \quad (18)$$

gdzie:

$$f_0 = 2,04 i^2 \cdot \frac{1}{a} 10^{-8} \text{ [kg/cm]} \quad (19)$$

jest sed z jaką oddziaływują na siebie dwa pręty z jednakowym prądem  $i$ , a

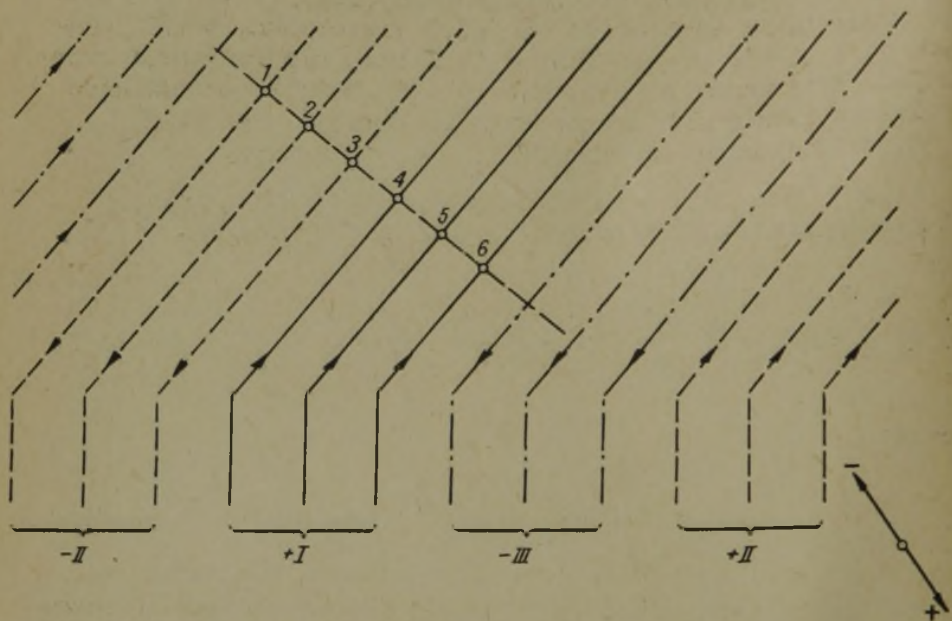
$$W_1 = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} = 2,28, \quad (20)$$

przedstawia współczynnik oddziaływania, którego wartość ocenia wielkość wpływu jaki wywierają na dwa sąsiednie pręty, prądy w prętach znajdujących się w dalszej odległości od rozpatrywanego punktu 1.

Z taką sed  $f_1$  będzie działać w punkcie 1 pięć pozostałych prętów fazy I i II przy czym będzie to działanie przyciągające w kierunku dodatnim.

b) Sed działającą na pręt krańcowy fazy I w punkcie 6 będzie posiadać tę samą wartość jednak kierunek działania tej siły będzie ujemny

$$f_6 = - f_1 \quad (21)$$



Rys.5. Do obliczenia sed 3-fazowego uzwojenia średnicowego

c) Sed działająca na pręt środkowy fazy II w punkcie 2 otrzymamy po uwzględnieniu wpływów poszczególnych prętów w następującej postaci:

$$f_2 = f_0 \cdot W_2 = f_0 \left( -1 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right)$$

$$f_2 = 1,083 \cdot f_0 \quad (22)$$

Porównanie współczynników wpływów  $W_1$  i  $W_2$  pozwoli stwierdzić, że sed w punkcie 2 jest prawie dwa razy mniejsza od sed w punkcie 1.

d) Sed działająca na pręt 5 fazy I:  $f_5 = -f_2$ , (23)

e) Sed działająca na trzeci pręt fazy II w punkcie 3; znajdziemy ją z relacji:

$$f_3 = f_0 \cdot W_3 = f_0 \left( -\frac{1}{2} - 1 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = 0,333 \cdot f_0 \quad (24)$$



f) Sed działającą na pręt w punkcie 4:

$$f_4 = f_0 \cdot W_4 = f_0 \left( -\frac{1}{3} - \frac{1}{2} - 1 + 1 + \frac{1}{2} \right) = -0,333 f_0 \quad (25)$$

Jak wspomniano przy obliczeniach sed działających na połączenia czołowe uzwojeń trzeba także uwzględnić wpływ kształtu przekroju prętów na wartość określonych sed. Robimy to praktycznie poprzez wprowadzenie do  $W$  odpowiednio znalezionych współczynników kształtu  $v_n$ .

Na przykład dla sed w punkcie 1 otrzymamy:

$$W_1 = v_1 + \frac{v_2}{2} + \frac{v_3}{3} + \frac{v_4}{4} + \frac{v_5}{5} \quad (26)$$

przy czym wartości współczynników kształtu znajdziemy dla różnych  $x$  posługując się krzywymi przedstawionymi na rys.4. Będzie więc:  $v_1 = f(x_1)$ ,  $v_2 = f(x_2)$ ,  $v_3 = f(x_3)$  .....

$$x_1 = \frac{h+b}{a}, \quad x_2 = \frac{h+b}{2a} = \frac{x_1}{2}, \quad x_3 = \frac{h+b}{3a} = \frac{x_1}{3} \dots\dots$$

Celem wyrobienia sobie pewnego poglądu na wartości sed, z którymi można spotkać się w warunkach eksploatacyjnych maszyny, na przykładzie przytoczonego przedtem prostego schematu uzwojenia dokonamy przeliczeń sed posługując się wprowadzoną formułą przy uwzględnieniu kształtu prętów i wpływu na sed prętów sąsiednich.

Z góry zakładamy, że tak uzyskane wyniki będą niekompletne i jak się okaże w dalszym ciągu tej pracy nie wyczerpują zagadnienia.

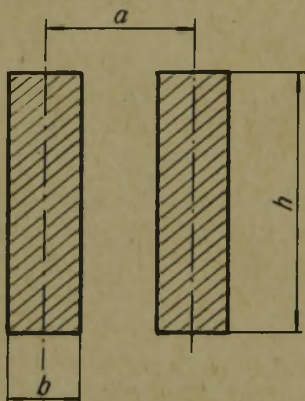
Do obliczeń przyjmujemy parametry zaczerpnięte z danych technicznych prądnicy typu TGHW 63 MW, dla której:

wysokość pręta  $h = 60$  mm

szerokość pręta  $b = 20$  mm

odległość od środków sąsiednich prętów  $a = 45$  mm

długość boków prętów czoła leżących obok siebie równolegle	$l = 725 \text{ mm}$
prąd znamionowy na bok cewki	$I_n = 4300 \text{ A}$
nadprzejściowy prąd zwarcia 3-biegunowego	$I_{zw_3} = 8,4 I_n$
nadprzejściowy prąd zwarcia 2-biegunowego	$I_{zw_2} = 6,55 I_n$
nadprzejściowy prąd zwarcia 1-biegunowego	$I_{zw_1} = 9,3 I_n$



Rys.6. Główne wymiary oddziałujących na siebie prętów

Przy pracy znamionowej dwa sąsiednie pręty tejże fazy oddziałują na siebie z jednostkową sed:

$$f_{on} = 2,04 (\sqrt{2} \cdot 4300)^2 \frac{10^{-8}}{4,5} = 0,1675 \text{ kG/cm.}$$

Przy zwarcii dwubiegunowym jednostkowa sed może się podnieść do wartości:

$$f_{oz_2} = 2,04 (\sqrt{2} \cdot 6,55 \cdot 4300)^2 \frac{10^{-8}}{4,5} = 7,2 \text{ kG/cm,}$$



czyli osiągnąć blisko 50-krotną wartość sed przy pracy znamionowej.

Przy założonym rozpięciu prądów (faza III bez prądu) przy zwarciu 2-fazowym sed wyniesie:

w punkcie 1:	$f_1 = f_0 \cdot W_1 = 7,2 \cdot 2,28 = 16,42 \text{ kG/cm}$
" 2:	$f_2 = f_0 \cdot W_2 = 7,2 \cdot 1,083 = 7,8 \text{ kG/cm}$
" 3:	$f_3 = f_0 \cdot W_3 = 7,2 \cdot 0,333 = 2,4 \text{ kG/cm}$
" 4:	$f_4 = f_0 \cdot W_4 = 7,2 \cdot (-0,333) = -2,4 \text{ kG/cm}$
" 5:	$f_5 = f_0 \cdot W_5 = 7,2 \cdot (-1,083) = -7,8 \text{ kG/cm}$
" 6:	$f_6 = f_0 \cdot W_6 = 7,2 \cdot (-2,28) = -16,42 \text{ kG/cm}$

Na część pręta czołowego o długości  $l = 72,5 \text{ cm}$ , leżącego równoległe do prętów sąsiednich, a więc w obszarze w którym można stosować podaną metodykę obliczeń będzie działać siła

$$F_1 = f_1 \cdot l = 16,42 \cdot 72,5 = 1190 \text{ kG.}$$

Stanowi to bardzo poważne chwilowe mechaniczne obciążenie dla tego odpowiedzialnego elementu konstrukcyjnego prądnicy, jaki stanowią połączenia czołowe uzwojeń stojana.

W celu uwzględnienia kształtu przekroju prętów, z krzywej (rys.4) dla stosunku  $\frac{b}{h} = \frac{20}{60} = 0,333$  i dla

$$x_1 = \frac{h+b}{a} = \frac{60+20}{45} = 1,78 \quad \text{znajduję} \quad v_1 = 0,82$$

$$x_2 = \frac{x_1}{2} = 0,89 \quad " \quad v_2 = 0,91$$

$$x_3 = \frac{x_1}{3} = 0,569 \quad " \quad v_3 = 0,98$$

$$x_4 = \frac{x_1}{4} = 0,44 \quad " \quad v_4 = 0,99$$

$$x_5 = \frac{x_1}{5} = 0,35 \quad " \quad v_5 = 0,995$$

$$x_6 = \frac{x_1}{6} = 0,3 \quad " \quad v_6 \cong 1$$

Po uwzględnieniu współczynnika kształtu dla prętów otrzymamy nieco mniejsze wartości współczynników oddziaływania  $W'_n$ , a mianowicie dla punktu 1

$$W'_1 = 0,82 + \frac{0,98}{2} + \frac{0,99}{3} + \frac{0,995}{4} + \frac{1}{5} = 2,089 \text{ (zamiast 2,28)}.$$

Biorąc więc pod uwagę kształt przekroju pręta, jednostkowa sed zwarciowa w punkcie 1 wyniesie:

$$f_1 = f_0 \cdot W'_1 = 7,2 \cdot 2,089 = 15 \text{ kG/cm,}$$

a całkowita sed działająca na długości 1 pręta

$$F'_1 = f'_1 \cdot l = 15 \cdot 72,5 = 1090 \text{ kG}$$

Obciążenie to stanowi ok. 90% tej wartości obciążenia, którą otrzymaliśmy prowadząc obliczenia bez uwzględnienia kształtu przekroju prętów.

Wyprowadzona formuła dla sed (równanie 17) podaje związki łączące chwilowe wartości sed z wartościami chwilowymi prądów przy uwzględnieniu szczegółów związanych z wpływem sąsiednich prętów i formy ich przekroju. Ale zależności występujące pomiędzy chwilowymi wartościami prądów występujących we wzorze na sed bezpośrednio rzutują na charakter przebiegów obliczonych sed, które będą również funkcjami czasu i będą zależęć od rodzaju zwarć. Dlatego też bliższe rozpoznanie tego zagadnienia ma bardzo ważne znaczenie praktyczne. Przede wszystkim chodzić nam będzie o znalezienie maksymalnych wartości sed, mogących występować w warunkach eksploatacyjnych prądnicy (w tym przy zwarciach) a także o wyjaśnienie okoliczności, przy których mogą wystąpić te niebezpieczne obciążenia uzwojeń.

W tym celu rozpatrzmy idealizowany przypadek włączenia napięcia sinusoidalnie zmiennego -  $u$  na obwód z indukcyjnością  $L$  przy  $R \approx 0$ . Będzie to więc jakaś zastępcza prądnica bez strat, powodujących mniejsze od 90° przesunięcia fazowe pomiędzy napięciem oraz prądem i której procesy przejściowe nie są tłumione z pewną stałą czasową dającą w innym przypadku wykładniczo zmiennie zanikanie tych procesów.



Nie będziemy ponadto uwzględniać prądu początkowego mogącego obciążać maszynę przed zaistnieniem zwarcia.

Gdy zatem:

$$u = \sqrt{2} u \sin(\omega t + \psi) \quad (27)$$

będzie chwilową wartością napięcia na zaciskach rozpatrywanej prądnicy, przy czym w chwili  $t_0$  zwarcia napięcie było równe zero, to prąd zwarcia ustalający się dla chwili  $t > t_0$ , wyniesie:

$$i = \sqrt{2} I_Z \cos(\omega \cdot t + \psi) - \sqrt{2} I_Z \cos \psi = \sqrt{2} I_Z [\cos(\omega t + \psi) - \cos \psi] \quad (28)$$

gdzie:

$I_Z$  - jest skuteczną wartością początkowego symetrycznego prądu zwarcia tj. składową prądu zwarcia odpowiadającą nadprzejsściowej reaktancji prądnicy (pierwsze maksimum prądu zwarcia),

$\psi$  - kąt odpowiadający fazie zaistnienia zwarcia.

Chociaż w 3-fazowych prądnicach możliwe są trzy typowe przypadki zwarć (trójfazowe zwarcie symetryczne, zwarcie dwubiegunowe i zwarcie jednobiegunowe) dające różne prądy zwarciove, jednak my przyjmujemy do niniejszej analizy prąd odniesienia  $I_Z$ , w stosunku do którego będziemy mogli wyrażać aktualne wartości prądów zwarciowych, a przebieg sed, występujących w wyniku przepływu dwóch prądów zwarciowych możemy przedstawić przy pomocy ogólnego wyrażenia:

$$f(F) = KI_Z^2 f(t, \varphi, \psi), \quad (29)$$

gdzie:

$f(t, \varphi, \psi)$  - funkcja wnosząca do analizy związki fazowe pomiędzy prądami będącymi przyczyną powstania sed,

$K$  - wartość stała uwzględniająca konfigurację i formę przekroju prętów,

$I_Z$  - skuteczna wartość prądu odniesienia.

Przez znalezienie maksimum funkcji:  $f(t, \varphi, \psi)$ , czyli maksimum z iloczynu dwóch prądów chwilowych zmieniających się w czasie zgodnie z wyrażeniem (28), przy uwzględnieniu odpowiedniego przesunięcia fazowego  $-\varphi$  tych prądów, dla różnych wartości  $t$  i  $\psi$  uzyskamy możliwość wyciągnięcia daleko idących ogólnych wniosków dotyczących przebiegów sed działających na uzwojenia prądnicy.

Wyniki obliczeń poszczególnych wartości funkcji:

$$f(t, \varphi, \psi) = 2 [\cos(\omega t + \psi) - \cos \psi] [\cos(\omega t + \psi - \varphi) - \cos(\psi - \varphi)] \quad (30)$$

dla różnych wartości  $t, \psi, \varphi$ , zebrane są w tablicy 1, zaś na rys.7a i 7b przedstawione są graficzne wyrażenia (30) w funkcji czasu, sporządzone przy wykorzystaniu danych tablicy 1.

Do analizy przyjęto trzy wartości przesunięć fazowych  $\varphi$ . Brano przy tym pod uwagę trzy typowe przypadki wystąpienia zwarc:

$\varphi = 0$  - dla zwarc jednobiegunowych,

$\varphi = 180^\circ$  - dla zwarc dwubiegunowych,

$\varphi = 120^\circ$  - dla zwarc trójfazowych.

Ponieważ jednak:  $\cos(\omega t + \psi) - \cos \psi = - [\cos(\omega t + \psi + \pi) - \cos(\psi + \pi)]$ , krzywe wykreślone dla  $\varphi = 0$  po zmianie znaku dadzą wartości dla  $\varphi = 180^\circ$ . (patrz rys.7a). Przebiegi  $f(t, \varphi, \psi)$  dla parametru  $\psi$  będą się przy tym zbiegać z krzywymi obliczonymi dla kąta  $\psi + 180^\circ$  (rys.7a).

Na rys.7b przedstawiono przebiegi dla  $\varphi = 120^\circ$ , przy czym będą one takie same gdy zamienimy  $\psi$  na  $\psi + 180^\circ$ . Takie same przebiegi uzyskamy dla  $\varphi = -120^\circ$  przy równoczesnej zamianie kąta  $\psi$  na kąt  $\psi + 60^\circ$ .

W wyniku przeprowadzonej analizy znaleźliśmy maksimum funkcji opisanej równaniem (30) co pozwala na wyciągnięcie następujących ważnych praktycznie wniosków:

1) W przypadku zwarc trójfazowych maksimum naszej funkcji mogą posiadać podwójne znaki. Z faktu tego wynika dalej, że i kierunki działania szkodliwych momentów od sed odkształcających połączenia czołowe uzwojeń przy zwarcach trójfazowych, które zaistniały w różnych warunkach  $t$ , i  $\psi$  nie są jednakowe. Przy zaistnieniu więc takich zwarc możemy spotkać się z różnymi rodzajami odkształceń.



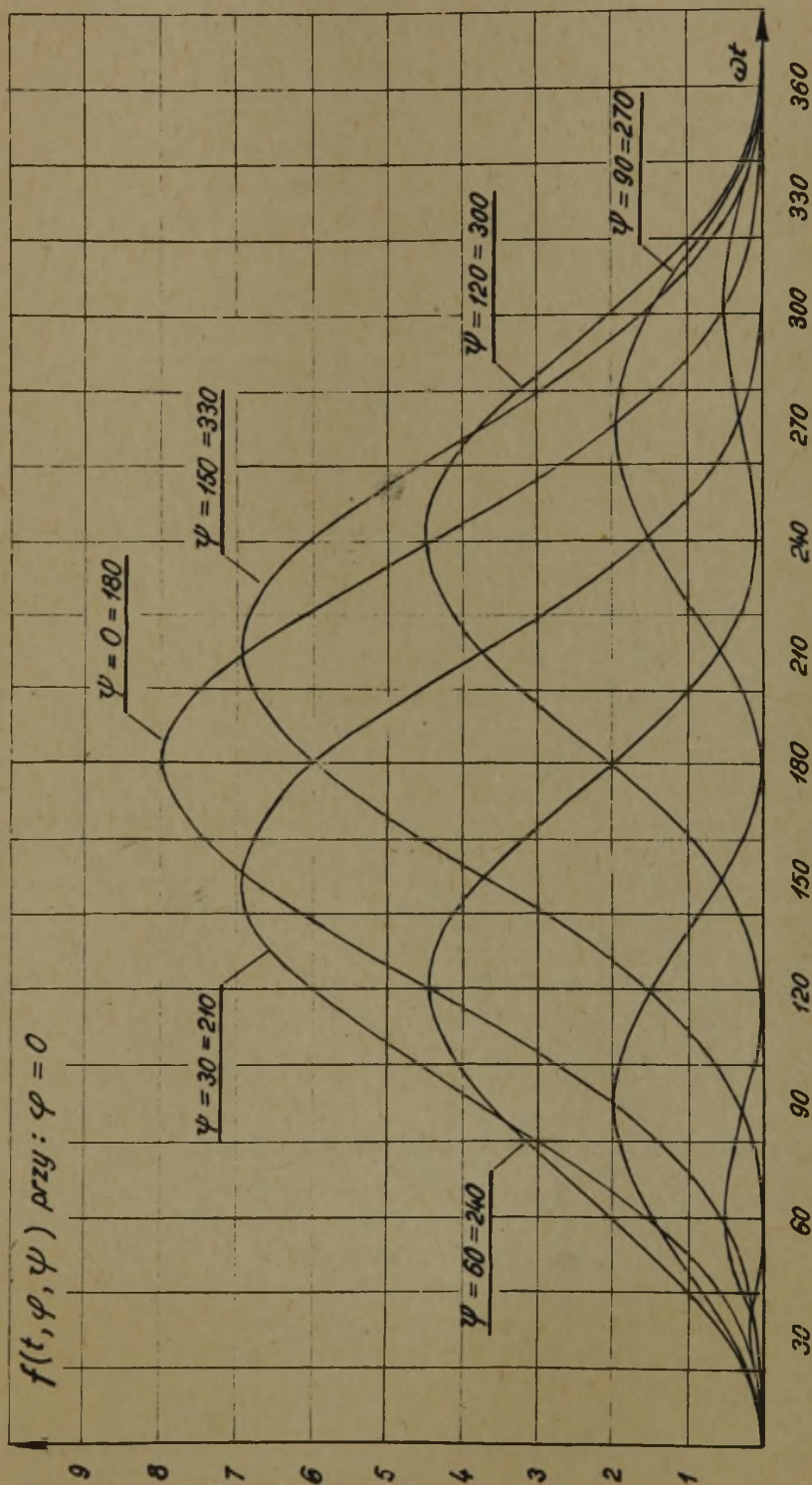
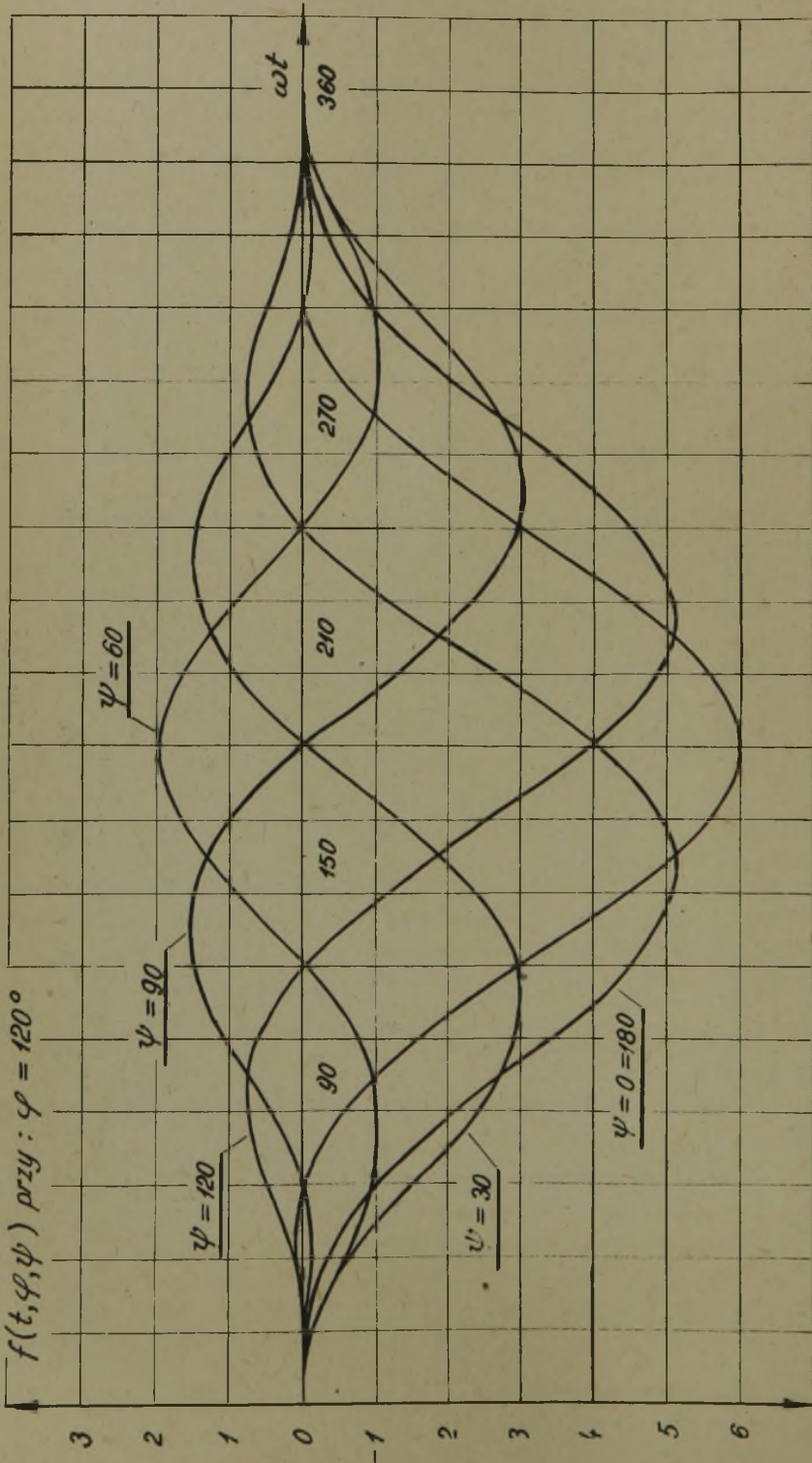


Рис. 7а



Rys. 7b



Tablica 1

Przebiegi funkcji:  $f(t, \varphi, \psi) = 2 [\cos(\omega t + \psi) - \cos \psi]$   
 $[\cos(\omega t + \psi - \varphi) - \cos(\psi - \varphi)]$

a) przy  $\varphi = 0^\circ$

$\psi \backslash \omega t$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
0 (180)	0	0,0359	0,5	2,0	4,5	6,96	8,0	6,96	4,5	2,0	0,5	0,0359	0
30 (210)	0	0,268	1,5	3,73	6,0	6,96	6,0	3,73	1,5	0,268	0	0,0359	0
60 (240)	0	0,5	2,0	3,73	4,5	3,73	2,0	0,5	0	0,268	0,5	0,268	0
90 (270)	0	0,5	1,5	2,0	1,5	0,5	0	0,5	1,5	2,0	1,5	0,5	0
120 (300)	0	0,268	0,5	0,268	0	0,5	2,0	3,73	4,5	3,73	2,0	0,5	0
150 (330)	0	0,0359	0	0,268	1,5	3,63	6,0	6,96	6,0	3,73	1,5	0,268	0

b) przy  $\varphi = 120^\circ$

$\psi \backslash \omega t$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
0 (180)	0	-0,134	-1,0	-2,73	-4,5	-5,1	-4,0	-1,866	0	-0,732	-0,5	0,0985	0
30 (210)	0	-0,366	-1,5	-2,73	-3,0	-1,866	0	1,386	1,5	0,732	0	-0,134	0
60 (240)	0	-0,366	-1,0	-1,0	0	1,366	2	1,366	0	-1,0	-1,0	-0,366	0
90 (270)	0	-0,134	0	0,732	1,5	1,366	0	1,866	3,0	2,732	-1,5	-0,366	0
120 (300)	0	0,098	0,5	0,732	0	-1,866	-4,0	-5,1	-4,5	2,732	-1	-0,134	0
150 (330)	0	0,0985	0	1,0	-3,0	-5,1	-6	-5,1	-3,0	-1,0	0	0,0985	0

2) Maksima badanych funkcji przy zwarciach trójfazowych posiadają zwykle mniejsze wartości w porównaniu do największych wartości otrzymywanych przy kątach  $\varphi = 0$  oraz  $\varphi = 180^\circ$ . Widać więc, że, gdy chodzi o działania elektrodynamiczne prądów zwarciovych, ogólny przypadek powstania zwarcia trójfazowego nie jest dla maszyny najniebezpieczniejszy.

Po uwzględnieniu związków fazowych między prądami ogólna formuła dla sed przyjmie więc postać:

$$f = 2,04 i_1 i_2 \frac{\sum(vw)}{a} \cdot y(t, \psi, \varphi) 10^{-8} \text{ [kG/cm]} \quad (31)$$

W wyniku znalezienia iloczynu dwóch funkcji sinusoidalnie zmiennych o jednakowej częstotliwości (a takie właśnie funkcje wchodzi w skład wzoru na sed) otrzymuje się wyrażenie posiadające trzy następujące składowe:

- 1) składową stałą w czasie, proporcjonalną do  $\cos(2\psi - \varphi)$ ,
- 2) składową zmieniającą się z podstawową częstotliwością  $-f$ , proporcjonalną do  $2 \cos(\omega t + 2\psi - \varphi)$ ,
- 3) składową zmieniającą się w czasie z podwójną częstotliwością harmoniczną  $-2f$ , proporcjonalną do  $\cos(2\omega t + 2\psi - \varphi)$ .

Powstające przy zwarciach znaczne i zmieniające się tak w czasie sed, działając na przedstawiające układ sprężysty pręty połączeń czołowych uzwojeń, pobudzają ten układ do drgań. Przy teoretycznym i konstrukcyjno technologicznym opracowywaniu problemu sed trzeba i na tę stronę zagadnienia zwrócić szczególną uwagę.

Uwzględniając w rozważaniach zjawisko tłumienia poszczególnych składowych prądu zwarcia, powodujących powstawanie sed, można udowodnić, że składowa sed o częstotliwości sieci zanika w najogólniejszym przypadku już po kilku okresach. Dlatego też pewne rozkołysanie się prętów w takt tej częstotliwości, z uwagi na istniejące silne tłumienie, nie jest niebezpieczne nawet wtedy, gdy częstotliwość drgań własnych prętów leży w pobliżu częstotliwości sieci.

Należy jednak konieczne unikać wystąpienia rezonansu z podwójną częstotliwością sieci ponieważ składowa sed o częstotliwości  $2f$  zanika z dużą stałą czasową (rzędu kilku sekund). Dlatego też z tego punktu widzenia konieczne jest dokładne zanalizowanie rozwiązania strony konstrukcyjnej mocowań połączeń czołowych uzwojenia.



Dla dwustronnie zamocowanego prostokątnego pręta miedzianego liczba drgań własnych podawana jest przez następujące wyrażenie:

$$f_w = 0,365 \frac{h}{l^2} 10^6 \text{ [okr/sek]}, \quad (32)$$

gdzie:

$l$  - wolna długość (pomiędzy podporami),

$h$  - wysokość pręta mierzona w płaszczyźnie drgań.

W przypadku przegubowo ułożyskowanych końców pręta stała występująca w wyrażeniu (32) wyniesie 0,162, a liczba drgań własnych tak umocowanej belki będzie wtedy wynosić około 44,4% liczby drgań w przypadku sztywnego zamocowania.

Posiadając te informacje możemy zawsze znaleźć taką "długość krytyczną", której częstotliwość drgań własnych wynosi  $2f$  (czyli 100 okr/sek), przy czym w zależności od rodzaju zamocowania pręta wyniesie ona:

$l_k = 60,4 \sqrt{h}$  przy sztywnie umocowanych końcach pręta,

$l_k = 40,2 \sqrt{h}$  przy przegubowo umocowanych końcach pręta.

Na przykład dla pręta z  $h = 0,6$  cm, długość krytyczna przy  $f = 100 \frac{\text{okr}}{\text{sek}}$  wyniesie odpowiednio:  $l_k = 45,3$  cm lub

$l_k = 30,2$  cm.

Teraz można będzie poprzez odpowiedni dobór podpórek wspierających i bandaży wyregulować wolną długość pręta w taki sposób, aby mieściła się ona wystarczająco daleko powyżej lub poniżej wartości odpowiadającej długości krytycznej pręta dla częstotliwości  $2f$ .

W interesujących nas przypadkach połączeń czołowych maszyn synchronicznych (a także indukcyjnych) zmuszeni jesteśmy - z uwagi na siły elektrodynamiczne - dobrać wolną długość prętów pomiędzy podpórkami z zasady poniżej długości krytycznych. Ponieważ liczba drgań własnych zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu wolnej długości, wystarczy najczęściej zmieniać tę długość w stosunkowo niedużym stopniu, by już wyjść poza niebezpieczny zakres.

Gdy częstotliwość drgań własnych pręta będzie leżeć w zakresie przewyższającym częstotliwość pobudzającą, wtedy pręt będzie drgał praktycznie zgodnie z częstotliwością sił pobu-

dzających te drgania. Momenty zginające pochodzące od tych sed będzie można obliczać tak samo jak przy obciążeniach statycznych.

Analiza złożonej konfiguracji prętów połączeń czołowych uzwojeń pozwala na wyciągnięcie dalszych wniosków dotyczących sed. Widać bowiem, że oprócz sed pochodzących od wzajemnego oddziaływania leżących równolegle obok siebie prętów w granicach jednej warstwy wystąpią jeszcze dalsze składowe sed.

Kolejne składowe sed będą pochodzić od wpływów prądów w dwóch leżących nad sobą warstwach, które tworzą pręty górnej i dolnej warstwy uzwojenia. Siły te będą się starać ustawić wzajemnie krzyżujące się pręty, niosące te same prądy, w położeniu, wzajemnie równoległym. Analityczne wyrażenie dla sed krzyżujących się prętów przyjmą daleko bardziej złożoną formę, ale jak najbardziej nadającą się do obliczeń praktycznych.

Pręty połączeń czołowych leżą w bliskiej odległości od innych elementów konstrukcyjnych maszyny, w szczególności wykonanych z materiału ferromagnetycznego. Stwarza to warunki do powstania dodatkowych sed z którymi w pewnych okolicznościach należy się też liczyć.

Zjawisko oddziaływania płaskiej powierzchni ferromagnetycznej na pręt z prądem znajdujący się od niej w pewnej odległości "a" można by objaśnić w ten sposób, że żelazo posiadając wysoką, przewodność magnetyczną będzie przyciągać linie indukcji magnetycznej istniejące wokół tych prętów, w wyniku czego w obszarze, aż do powierzchni ferromagnetycznej linie indukcji będą miały taki przebieg jak gdyby z drugiej strony płaszczyzny podziału znajdował się drugi przewodnik niosący taki sam prąd.

Powstanie wtedy sed, która będzie przyciągać dany pręt z prądem do płyty ferromagnetycznej i zgodnie z metodą odbić zwierciadlanych ta siła przyjmie taką samą wartość z jaką przyciągają się dwa przewodniki z jednakowym prądem leżące obok siebie w odległości  $2a$ .

Na połączenia czołowe uzwojeń twornika maszyny synchronicznej mogą wreszcie działać sed pochodzące od wzajemnego oddziaływania prądów uzwojeń twornika i uzwojeń magnetycy (w tym i obwodów tłumiących). W większości przypadków te sed działają na połączenia czołowe w kierunku promieniowym od i dośrodkowym. Obciążają one na rozciąganie układ pierścieni bandażujących czoła stojana.



Oddziaływanie prądów magnesnicy na sed połączeń czołowych będzie stanowiło oddzielny temat badań prowadzonych w Katedrze Maszyn Elektrycznych przy zastosowaniu modeli.

Wszystkie wyszczególniane sed obciążające połączenia czołowe uzwojeń rozkłada się dalej na siły styczne i promieniowe. Odpowiednio do tych składowych sed wykonuje się mocowania i podpory czoł. Układ podpór i odstępników połączonych sztywno z prętami połączeń czołowych zapewnia odpowiednią sztywność tych połączeń, zachowanie ustalonych odstępów pomiędzy ich poszczególnymi bokami oraz stanowi opór przeciwko działaniu sił styčných. Promieniowe udary sed przejmują na siebie pierścienie (bandaże) czołowe wraz z systemem odpowiednich wsporników do których mocuje się pręty połączeń czołowych.

Należy tu zaznaczyć, że przy maszynach szybkoobrotowych obciążenia połączeń czołowych pochodzące od sed, głównie w wyniku większej długości czoł, są o wiele silniejsze niż przy maszynach z większą liczbą par biegunów. Maszyny wolnoobrotowe wykazują ponadto większe wartości dla reaktancji niż szybkoobrotowe. Dlatego też usztywnienia połączeń czołowych uzwojeń maszyn typu turbo powinny być wykonane ze szczególną starannością przy uwzględnieniu uzasadnionych teoretycznie rozwiązań konstrukcyjnych tych mocowań. Zapewni to w efekcie możliwie niezawodną pracę uzwojeń z uwagi na duże obciążenia sed mogące pojawić się w warunkach eksploatacyjnych.

Przedstawione w pracy podstawy metody określania sed przez ocenę wzajemnego oddziaływania obwodów z prądami nie są jedyną i najdokładniejszą drogą znajdowania interesujących wielkości. Metoda ta pozwala jednak w najprostszy i najszybszy sposób ocenić przybliżone wartości sił z jakimi możemy się spotkać w praktycznej działalności, zarówno jako użytkownicy jak i projektanci układów z maszynami i aparatami elektrycznymi. Poruszenie innych sposobów określenia nacisków elektrodynamicznych (np. metody określenia sed poprzez analizę zmiany energii magnetycznej układu) w zastosowaniu do uzwojeń maszyn elektrycznych wychodzi poza zakres niniejszej pracy.

Zagadnienia związane z kompleksowym ujęciem tych zjawisk od strony teoretycznej jak i doświadczalnej będą w dalszym ciągu przedmiotem prac prowadzonych przy współpracy z M-5 DOLMEL w Katedrze Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej.

## LITERATURA

- [1] P. L. K a l a n t a r o w i L. P. N e j m a n: Teoreticzeskije osnovy elektrotechniki. GEI 1954.
- [2] G. B. H o l j a w s k i j: Rasczjet elektrodinamiczeskich usilij w elektriczeskich apparatach. GEI 1962.
- [3] G. L e i n e r: Wicklungsbeanspruchungen bei plötzlichen Kurzschlüssen von Synchrongeneratoren. E.u.M, J.59 N. 45/46. 1941.
- [4] H. B. D w i g h t: Repulsion Between Strop Conductors. Electr. Wld. N.Y. 70, s.522.
- [5] G i u s e p p e Z i n g a l e s: Azioni meccaniche delle correnti di cortocircuito nelle macchine sincrone. L'Elektrotecnica XI. 1953.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ НАГРУЗКИ ОБМОТКИ  
ЯКОРЕВ СИНХРОННЫХ МАШИН

Обращается внимание на расхождения в мнениях относительно программы испытаний при коротком замыкании, произведенных до сдачи машины в эксплуатацию. Это связано с необходимостью теоретической и опытной разработки ряда вопросов связанных с образованием электродинамических сил (ЭДС), нагружающих обмотки машины в производственных условиях. Автор пытается аналитически представить часть явления на основании общего принципа влияния щипей на ток.

Рассматривается образование ЭДС в пространстве и во времени, получая при этом выводы, имеющие практическое значение образования колебаний и деформации, вызванных этими ЭДС.



**LES FORCES ÉLECTRODYNAMIQUES QUI CHARGENT LES ENROULEMENTS  
DES INDUITS DES MACHINES SYNCHRONES**

Dans cet ouvrage on a discuté les divergences des points de vue concernant le programme des essais de court-circuit réalisés avant la mise de la machine à l'exploitation, ce qui nécessite l'explication théorique et expérimentale d'une quantité de problèmes où les forces électrodynamiques agissent sur les enroulements dans les conditions d'exploitation. Dans cet ouvrage on a essayé de concevoir une partie de phénomènes à l'aide d'une méthode analytique en se basant sur la loi générale de réactions réciproques des circuits des courants. On considère les forces électrodynamiques, qui se produisent en espace et en temps limité en obtenant, en même temps, les conclusions pratiques, concernant les oscillations causées par les forces électrodynamiques.