

Bronisław Drak

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechnika Śląska

STAN OBCIĄŻENIA ELEKTRODYNAMICZNEGO CZOŁA UZWOJEŃ STOJANÓW MASZYN ELEKTRYCZNYCH DUŻEJ MOCY PRĄDU PRZEMIENNEGO

Streszczenie. Przedstawiono metodę obliczeń sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy. Opisano model fizyczny czoła uzwojenia stojana. Podano wyniki oraz analizę sił elektrodynamicznych.

Резюме. Представлен метод вычислений электродинамических усилий действующих на лобовые части обмоток статоров электрических машин большой мощности. Описана физическая модель лобовой части обмотки статора. Представлены результаты вычисления и анализ электродинамических усилий.

Summary. The method of calculation of electrodynamic forces acting on the end stator windings of large electrical machine has been presented. The physical model of the end stator winding has been described. The results and the analysis of electrodynamic forces have been given.

1. WSTĘP

Uzwojenie stojana maszyny elektrycznej dużej mocy prądu przemiennego jest uzwojeniem dwuwarstwowym, którego czoła cewek są rozłożone na dwóch powierzchniach stożkowych - dolnej i górnej warstwy uzwojenia stojana.

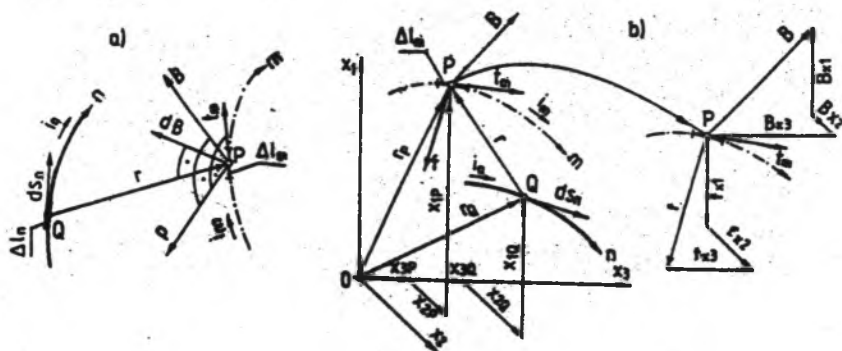
Prądy płynące w uzwojeniach stojana wywołują siły elektrodynamiczne działające na cewki uzwojenia; tak w części żłobkowej, jak i na czołach cewek. Siły te są funkcją: prądów płynących w uzwojeniach stojana i wirnika, kształtu czoł uzwojeń oraz elektrodynamicznych oddziaływań pakietu stojana, pakietu wirnika i korpusu maszyny. Obliczenie tych sił - mimo że jest zagadnieniem trudnym, tak z uwagi na krzywoliniowy przestrzenny kształt czoł uzwojeń, jak i trudności dokładnego uwzględnienia oddziaływań: prądów wir-

nika, pakietów żelaza i korpusu maszyny - jest niezbędne do obliczeń wytrzymałościowych usztywnień czoł uzwojenia stojana.

Siły elektrodynamiczne o podwójnej częstotliwości prądu płynącego w uzwojeniach, wywołują drgania uzwojeń stojana, które prowadzą do uszkodzeń izolacji cewek oraz pogorszenia usztywnień cewek, a w konsekwencji do trwałych odkształceń czoł cewek uzwojenia stojana.

2. METODA OBLICZEŃ SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH

Obliczenia sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojenia stojana maszyny elektrycznej prądu przemiennego opierają się na metodzie wykorzystującej równania Laplace'a i prawa Biota-Savarta do wyznaczania oddziaływań elektrodynamicznych między dwoma przewodami przewodzącymi prąd elektryczny. Kształt tych przewodów opisuje się równaniami parametrycznymi w stacjonarnym układzie współrzędnych prostokątnych x_i ($i = 1, 2, 3$) przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Oddziaływanie elektrodynamiczne między przewodami m i n

Fig. 1. Electrodynamic interaction between the conductore n and m

Elementarny wektor indukcji magnetycznej $d\vec{B}$ w punkcie P przewodu m , wywołanej prądem I_n płynącym w wycinku Δl_n przewodu n (rys.1a), jest prostopadły do płaszczyzny utworzonej przez ten punkt oraz wektor $d\vec{s}_n$ - styczny do przewodu n w punkcie Q . Wypadkowy wektor indukcji magnetycznej \vec{B} w punkcie P , wywołanej prądem I_n płynącym w przewodzie n o długości l_n wynosi:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{I_n} \frac{[d\vec{s}_n \times \vec{r}]}{|\vec{r}|^3} I_n \quad (1)$$

gdzie:

μ_0 - przenikalność magnetyczna w próżni,

$d\vec{s}_n$ - wektor elementarny, styczny do przewodu n w punkcie Q ,

\vec{r} - wektor o długości $|\vec{r}|$ równej odległości punktu Q od punktu P ,

I_n - prąd w przewodzie n , płynący zgodnie ze zwrotem wektora $d\vec{s}_n$.

Wektor liniowej gęstości siły elektrodynamicznej \vec{f} w punkcie P elementarnego wycinka Δl_m przewodu m , wywołanej oddziaływaniem prądu I_m tego przewodu na pole magnetyczne \vec{B} w tym punkcie, wytworzone przez prąd I_n wynosi:

$$\vec{f} = I_m [\vec{t}_m \times \vec{B}] = I_m I_n [\vec{t}_m \times \vec{B}^*] = I_m I_n \vec{f}^* \quad (2)$$

gdzie:

\vec{t}_m - wektor jednostkowy, styczny do przewodu m w punkcie P ,

\vec{B}^* - wektor indukcji magnetycznej w punkcie P , wywołany prądem $I_n = 1A$,

$\vec{f}^* = [\vec{t}_m \times \vec{B}^*]$ - wektor liniowej gęstości sił elektrodynamicznych, wywołanych prądami $I_m = I_n = 1A$.

I_m - prąd w przewodzie m , płynący zgodnie ze zwrotem wektora \vec{t}_m .

Położenie punktów P na przewodzie m oraz punktów Q na przewodzie n , wyznaczają odpowiednio wektory wodzące \vec{r}_P i \vec{r}_Q (rys. 1b). Składowe tych wektorów w układzie współrzędnych x_i ($i = 1, 2, 3$), mogą być zapisane w postaci macierzy jednokolumnowych:

$$\vec{r}_P = \text{col}(x_{iP}), \quad \vec{r}_Q = \text{col}(x_{iQ}). \quad (3)$$

Różnica tych wektorów jest wektorem \vec{r} -wodzącym punkty Q na przewodzie n względem punktu P na przewodzie m . Współrzędne wektora \vec{r} wynoszą

$$\vec{r} = \vec{r}_P - \vec{r}_Q = \text{col}(x_{iP} - x_{iQ}). \quad (4)$$

Z zależności (2) wynika, że wektor \vec{f}^* zależy od kształtu czoł uzwojenia stojana i wirnika oraz ich wzajemnej konfiguracji. Wartości prądów I_m i I_n oblicza się dla stanów nieustalonych maszyn elektrycznych [L.3].

Liniovą gęstość sił elektrodynamicznych, działających na czoła uzwojenia stojana maszyny prądu przemiennego, wyznacza się przez superpozycję oddziaływań elektrodynamicznych - decydująco wpływających na ich wartość. I tak uwzględnia się:

- wpływ prądów płynących w uzwojeniach stojana,
- wpływ prądów płynących w uzwojeniach i obwodach zastępczych wirnika,
- wpływ pakietu stojana i wirnika oraz korpusu maszyny elektrycznej.

Przyjmuje się, że prądy stojana płyną w jednowymiarowych cewkach jego uzwojenia oraz, że prądy wirnika płyną w jednowymiarowych uzwojeniach wirnika lub jego obwodach zastępczych. Pomija się wpływ dynamicznej zmiany odległości między bokami czół cewek (w wyniku ugięć czół, wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych) na zmiany wartości indukcji magnetycznej w przes-trzeni czół uzwojenia maszyny prądu przemiennego.

Do analizy rozkładu sił elektrodynamicznych wzdłuż czół cewek uzwojeń stojanów - dogodniejsza jest znajomość składowych liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w lokalnym układzie współrzędnych s_w ($w = 1, 2, 3$), uwidocznionym na rys. 2.

Wyzyskując związki transformacyjne między prostokątnymi układami współrzędnych x_i oraz s_w , obowiązujące dla modelu fizycznego czoła cewki uzwojenia stojana [L.2] - składowe wektora liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w lokalnym układzie współrzędnych wynoszą

$$\vec{f} = \text{col}(f_{s_w}) = [a_{i_w}]_{i_x w} [f_{x_i}]_i \quad (5)$$

gdzie:

f_{s_w} - wypadkowa w -ta składowa wektora liniowej gęstości sił elektrodynamicznych \vec{f} wyrażona w układzie współrzędnych s_w ,

f_{x_i} - i -ta składowa wektora \vec{f} wyrażona w układzie współrzędnych x_i ,

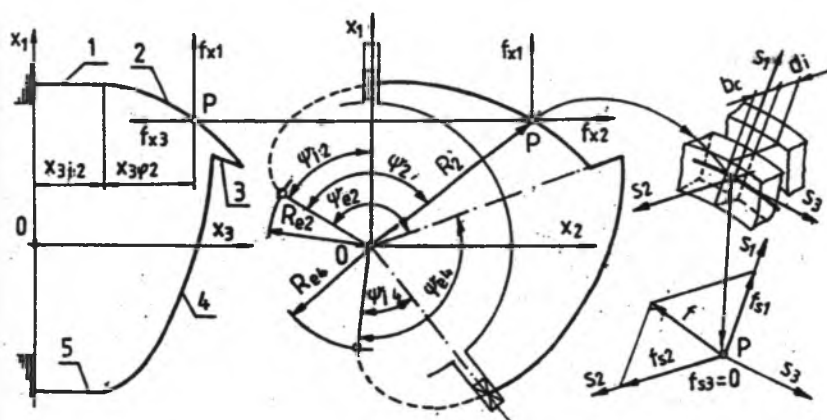
a_{i_w} - cosinusy kątów transformacji między układami współrzędnych.

3. MODEL FIZYCZNY CZÓŁ UZWOJENIA STOJANA MASZYNY ELEKTRYCZNEJ DUŻEJ MOCY PRĄDU PRZEMIENNEGO

Zapis analityczny kształtu czół cewek uzwojenia stojana maszyny elektrycznej dużej mocy prądu przemiennego [L.1], umożliwi obliczenie liniowej gęstości sił elektrodynamicznych, działających na czoła uzwojenia stojana,

przy uwzględnieniu ich rzeczywistego kształtu. Jednak z uwagi na to, że elementy wykorbienia czół półcevek (stanowiące łuki przejścia prostoliniowych wysięgów żłobkowych cewki w jej główne łuki stożkowe), są stosunkowo krótkie w porównaniu z głównymi łukami stożkowymi - dokonuje się uproszczenia rzeczywistego kształtu czół cewek, które nie mają znaczącego wpływu na wartość sił elektrodynamicznych. Czoło cewki zastępuje się przewodem jednowymiarowym porywającym się z linią średnią czoła cewki (rys. 2), przy czym:

- zakłada się bezpośrednie przejście prostoliniowego wysięgu żłobkowego półcewki w jej główny łuk stożkowy,
- przyjmuje się prostoliniowy wysięg żłobkowy równy odległości płaszczyzny granicznej pakietu stojana od punktu, w którym przedłużenie linii średniej głównego łuku stożkowego przebiega płaszczyznę wyznaczoną przez wysięg żłobkowy i oś podłużną maszyny,
- główkę cewki zastępuje się odcinkiem łączącym końcowe punkty głównych elementów stożkowych dolnej i górnej półcewki.



Rys. 2. Model fizyczny czół uzwojenia stojana

Fig. 2. Physical model of the stator winding

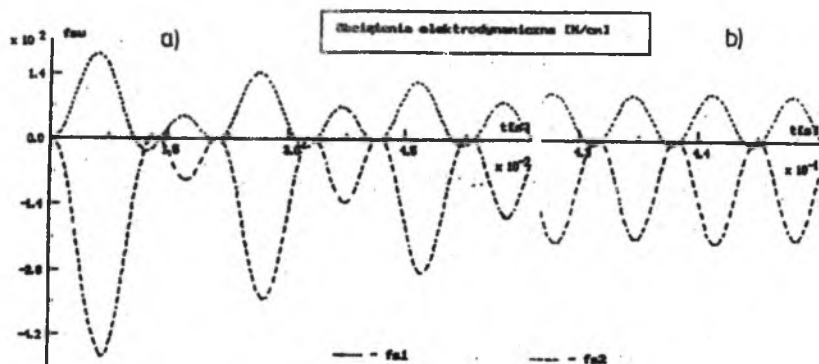
W tak przyjętym modelu fizycznym czoła cewki uzwojenia stojana wyróżnia się pięć elementów składowych (rys. 2), a mianowicie:

- 1 - prostoliniowy wysięg żłobkowy półcewki górnej warstwy uzwojenia,
- 2 - główny łuk stożkowy górnej półcewki,
- 3 - prostoliniowy odcinek zastępujący główkę cewki,
- 4 - główny łuk stożkowy dolnej półcewki,
- 5 - prostoliniowy wysięg żłobkowy półcewki dolnej warstwy uzwojenia.

4. WYNIKI OBLICZEŃ SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH

Przedstawiona w zarysie metoda obliczeń sił elektrodynamicznych oraz zapis analityczny kształtu modelu fizycznego uzwojeń maszyn elektrycznych [L.2], umożliwia opracowanie programów komputerowych do obliczeń i analizy tych sił. Przeprowadzone obliczenia prowadzą do wniosków:

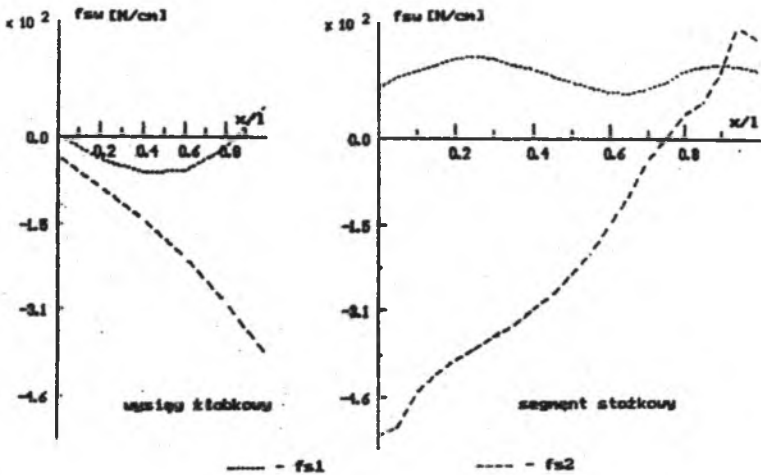
1. Siły elektrodynamiczne działają z podwójną częstością prądów płynących w uzwojeniach maszyny elektrycznej prądu przemiennego. W nieustalonych stanach pracy maszyny - na sinusoidalny przebieg tych sił - nakładają się przebiegi aperiodyczne (rys. 3a), wynikające z prądów płynących w uzwojeniach maszyny. Po zaniku składowych aperiodycznych prądów, siły elektrodynamiczne mają przebiegi sinusoidalne (rys. 3b). W nieustalonych stanach pracy maszyny elektrycznej - siły elektrodynamiczne w uzwojeniach silnika indukcyjnego mogą być 80-krotnie, a w turbogeneratorach nawet 150-krotnie większe od ich wartości w stanach ustalonych przy obciążeniu znamionowym.



Rys. 3. Siły elektrodynamiczne w czasie rozruchu silnika indukcyjnego

Fig. 3. Electrodynamics forces during starting of induction motor

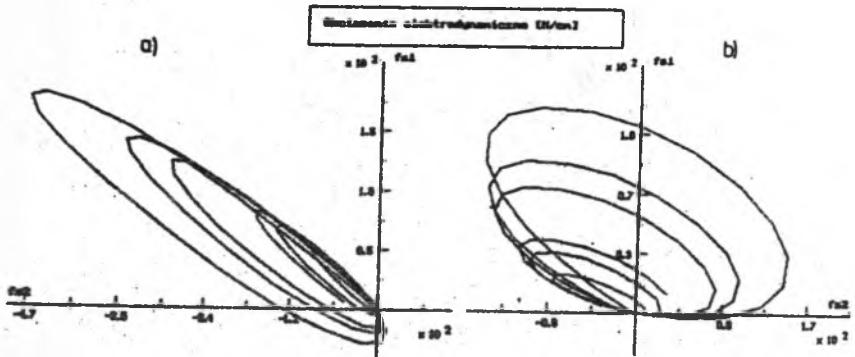
2. Siły elektrodynamiczne są rozłożone w sposób ciągły wzdłuż czoła uzwojenia (rys.4). Rozkład ten jest inny dla każdej cewki wchodzącej w uzwojenie bieguna maszyny elektrycznej i jest zmienny w czasie. Największe siły elektrodynamiczne działają na skrajne cewki w grupach fazowych uzwojenia stojana.



Rys. 4. Chwilowy rozkład sił elektrodynamycznych wzdłuż czoła cewki uzwojenia stojana

Fig. 4. Temporary distribution of electrodynamic forces along end of stator winding

3. Siły elektrodynamiczne działają w płaszczyznach prostopadłych do linii średniej zarysu czoła cewki uzwojenia stojana. Końce wektorów tych sił zakreślają krzywe zbliżone do elips, których kształt zależy od umiejscowienia przekroju poprzecznego czoła cewki.



Rys. 5. Trajektorie wektorów sił elektrodynamycznych

Fig. 5. Trajectories of electrodynamic forces vectors

LITERATURA

- [1] Drak B.: Geometria i kształtowanie czoł uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. ZN Pol.Śl. ser. Elektryka nr 110, 1990.
- [2] Drak B.: Wyznaczanie sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. ZN. Pol. Śl. ser. Elektryka" nr 110, 1990.
- [3] Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1986.

ELECTRODYNAMIC LOAD OF STATOR END WINDINGS OF LARGE A. C. MACHINES

The calculation of the electrodynamic forces acting on the stator end windings of a. c. machines leans on the method using the Laplace equations and the Biot-Savart laws to determine the electrodynamic forces between two current conductors. The shape of these conductors is described parametrically in the stationary orthogonal coordinates x_j ($j = 1, 2, 3$) - fig.1.

The flux density vector \vec{B} in the point P, created by the current i_n flowing in the conductor n of the length l_n determines the expression (1).

The linear force density vector \vec{f} in the point P of the elementary segment Δl_m conductor's m caused by the reaction of the current i_m on the field \vec{B} produced in this point by the current i_n describes the expres. (2).

The position of the points P on the conductor m and points Q on the conductor n is determined by the radius vectors \vec{r}_P, \vec{r}_Q (fig. 1b) which coordinates are described in the form of matrix vectors.

In the calculations of the electrodynamic forces the overhang of the stator winding substitutes for one dimensional conductor passing through the middle line of the overhang. The crank shaped segment of the overhang approximates by the direct passage from the straight line sector into the "evolvent" shaped segment and the nose part of the coil substitutes for the straight line.

The frequency of the steady state electrodynamic forces is twice the frequency of the currents flowing in the windings. During the transient processes the additional aperiodic components of the electrodynamic forces appear (fig. 3a). They are caused by the transient currents flowing in the windings. The vector ends describe nearly ellipse shaped trajectories.