ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: Elektryka z. 47 Nr kol. 426

Tadeusz Sztajer

Zakład Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

KOMPENSACJA PÓL PULSUJĄCYCH W SZCZELINIE SILNIKA LINIOWEGO

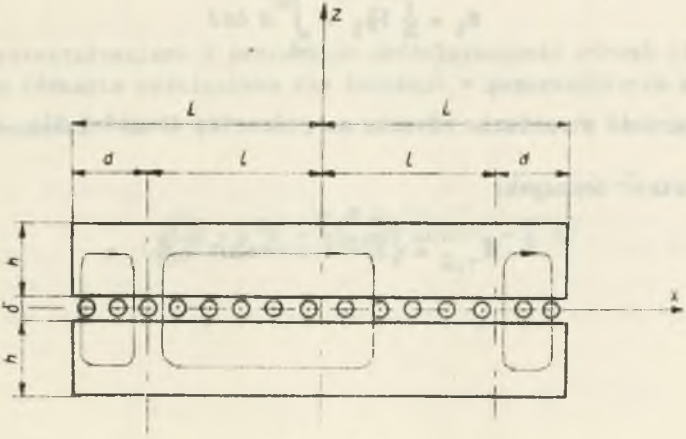
Streszczenie. W artykule przedstawiono sposoby kompensacji pól pulsujących w szczelinie silnika liniowego oraz wpływ kompensacji pola na przebieg charakterystyk silników Sl-100 i Sl-270 w stanie zahamowanym oraz w ruchu.

Wstęp

Jednym z ważniejszych czynników różniących silnik liniowy od wirującego silnika indukcyjnego jest występowanie w szczelinie silnika, oprócz pola ruchomego w przestrzeni, pól nieruchomych przemiennych w czasie. Te pulsujące pola powstają pod wpływem zjawisk brzegowych wywołanych skończoną długością rdzenia twornika.

Pole w szczelinie rozpatrzono na modelu przedstawionym na rys. 1. W strefie środkowej maszyny znajduje się uzwojenie wytwarzające okład prądowy:

$$A = \frac{\sqrt{2}\, zm\, J}{p\tau}\, k \cos(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) \qquad (1)$$



Rys. 1

gdzie:

z - liczba zwojów jednej fazy uzwojenia,
m - liczba faz,
p - liczba par biegunów,
k - współczynnik uzwojenia,
τ - podziałka biegunowa.

Przyjmujemy, że w kierunku osi z w jarzmie $\mu = \infty$, a w kierunku osi x $\mu_s = \mu$.

Dla podanych na rys. 1 konturów obowiązuje

$$\oint H \cdot dl = \Sigma i \tag{2}$$

Dla części środkowej równanie (2) przybiera postać

$$\frac{B(x=-1)}{\mu_o}\delta' - \frac{B}{\mu_o}\delta' + \frac{2}{\mu_s}\int_{-1}^{x} B_t \, dx =$$

$$= \int_{-1}^{x} A_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)\, dx \tag{3}$$

gdzie:

$\delta' = \delta \, k_c \, k_n$ - szczelina zastępcza,

k_c - współczynnik Cartera,

k_n - współczynnik uwzględniający nasycenie zębów,

$$B_t = \frac{1}{h}\left(\Phi_t + \int_{-1}^{x} B \, dx\right)$$

Φ_t - wartość strumienia rdzenia na jednostkę długości dla $x = -1$.

Przepływ stref bocznych:

$$\Theta_{1,2} = \sqrt{2}\, z \, J \, k \cos(\omega t + \frac{\pi}{3}) \tag{4}$$

Równanie (2) dla części lewej:

$$\frac{B_{(x=-l-d)}}{\mu_o}\delta' - \frac{B_1}{\mu_o}\delta' + \frac{2}{\mu_s}\int_{-(l+d)}^{x} B_{t1}\,dx =$$

$$= \Theta_m \cos(\omega t + \pi/3) \tag{5}$$

gdzie:

$$B_{t1} = \frac{1}{h}\int_{-(l+d)}^{x} B_1\,dx$$

Równanie (2) dla części prawej

$$\frac{B_2}{\mu_o}\delta' - \frac{B_{(x=l+d)}}{\mu_o}\delta' - \frac{2}{\mu_s}\int_{x}^{l+d} B_{t2}\,dx =$$

$$= \Theta_m \cos(\omega t + \pi/3) \tag{6}$$

gdzie:

$$B_{t2} = \frac{1}{h}\int_{x}^{l+d} B_2\,dx$$

$$\Theta_m = \sqrt{2}\, z\, J$$

Po przekształceniach i dwukrotnym zróżniczkowaniu równań (3), (5), (6) otrzymamy równanie różniczkowe dla indukcji w poszczególnych strefach:

Strefa środkowa:

$$\frac{d^2B}{dx^2} - \beta^2 B = \frac{\mu_o \pi A_m}{\delta' \tau}\sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau}x) \tag{7}$$

gdzie:

$$\beta = \sqrt{\frac{2\mu_o}{\mu_s h \delta'}}$$

$$\frac{d^2B_1}{dx^2} - \beta^2 B_1 = 0 \tag{8}$$

$$\frac{d^2B_2}{dx^2} - \beta^2 B_2 = 0 \tag{9}$$

Rozwiązania równań (7), (8), (9) mają postać:

$$\begin{aligned} B &= B_{\delta x} + C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} \\ B_1 &= C_3 e^{\beta x} + C_4 e^{-\beta x} \\ B_2 &= C_5 e^{\beta x} + C_6 e^{-\beta x} \end{aligned} \tag{10}$$

Po wykorzystaniu warunków brzegowych dla określenia stałych całkowania otrzymujemy równanie

$$B = B_\delta \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) -$$

$$-(-1)^P B_c' \operatorname{ch}\beta x \sin\omega t - (-1)^P B_s' \operatorname{sh}\beta x \cos\omega t \tag{11}$$

gdzie:

$$B_\delta = \frac{\mu_o \pi A_m}{(\alpha^2 + \beta^2)\delta'\tau}$$

$$B_c' = \frac{\operatorname{sh}\beta d}{\operatorname{sh}\beta L} B_\delta$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau}$$

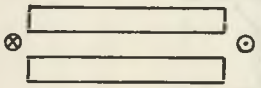
$$B_s' = \left[(-1)^P \frac{\beta}{\alpha} \frac{\operatorname{ch}\beta d}{\operatorname{ch}\beta L} + \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha} \frac{\operatorname{ch}\beta d}{\operatorname{ch}\beta L}\right] B_\delta$$

Oprócz pola postępującego, występują w równaniu (11) pola pulsujące zmieniające się wg cosinusa i sinusa hiperbolicznego. Jeśli założymy, że $\mu_s = \infty$, wtedy $\rho = 0$ i otrzymujemy:

$$B = B_\delta \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) - (-1)^p B_c \sin\omega t$$

gdzie:

$$B_c = \frac{d}{l + d} B_\delta$$



Rys. 2

Pulsujące pola powstają wskutek działania na krańcach twornika przemiennych przepływów, aby je zlikwidować należy wywołać za pomocą dodatkowych przewodów takie same przepływy lecz o przeciwnym znaku. Sposób umieszczenia cewki kompensującej przedstawiono na rys. 2.

Wartość amplitudy przepływu kompensującego musi być równa wartości amplitudy przepływu uzwojenia twornika

$$\sqrt{2}\ z_k J_k = \frac{m}{\pi} \sqrt{2}\ \frac{z k_q}{p} I$$

gdzie:

k_q - współczynnik uzwojenia,

z_k - liczba zwojów uzwojenia kompensacyjnego,

J_k - prąd uzwojenia kompensującego.

Sposoby kompensacji pola pulsującego

1. Uzwojenie kompensacyjne

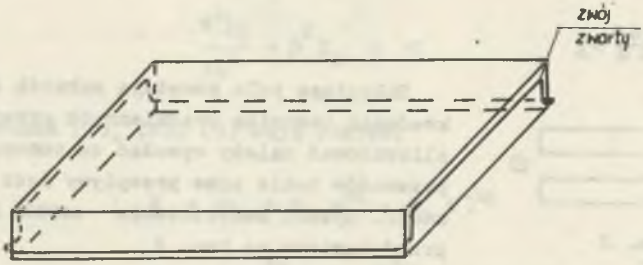
W płaskich maszynach liniowych powszechnie stosuje się uzwojenie wielofazowe dwuwarstwowe. Ostatnie żłobki rdzenia są wtedy wypełnione tylko w połowie. Powstaje pole pulsujące, a pole postępowe na końcach twornika jest osłabione.

Uzwojenie kompensacyjne wykonuje się w postaci dodatkowych cewek po 3q (q - ilość żłobków na biegun i fazę) na każdym końcu twornika, ich drugie boki znajdują się poza obrębem strefy aktywnej. Wartość przepływu kompensacyjnego można określić, przyrównując go do spadków napięcia magnetycznego od strumienia pulsującego Φ_{bm} na szeregowo połączonych oporach szczelin na odcinku l i d.

$$F_k = \Phi_{bm} \left(\frac{\delta}{\mu_o\ d\ b_{Fe}} + \frac{\delta}{\mu_o l\ b_{Fe}}\right) = B_c \frac{\delta}{\mu_o} \frac{l + d}{d}$$

2. Zwój zwarty

Jeżeli rdzeń twornika obejmiemy zwojem zwartym, tak jak pokazano na rysunku 3, to pole pulsujące wyindukuje w nim SEM E_2, co spowoduje przepływ prądu I_2. Prąd ten wytworzy pole przeciwdziałające polu pulsującemu, tym skuteczniej, im mniejsza jest rezystancja zwoju zwartego.



Rys. 3

3. Inne sposoby kompensacji

Zmniejszenie pola pulsującego uzyskuje się przez zwiększenie szczeliny powietrznej na końcach rdzenia, przez co uzyskuje się zmniejszenie przewodności magnetycznej dla strumienia pulsującego.

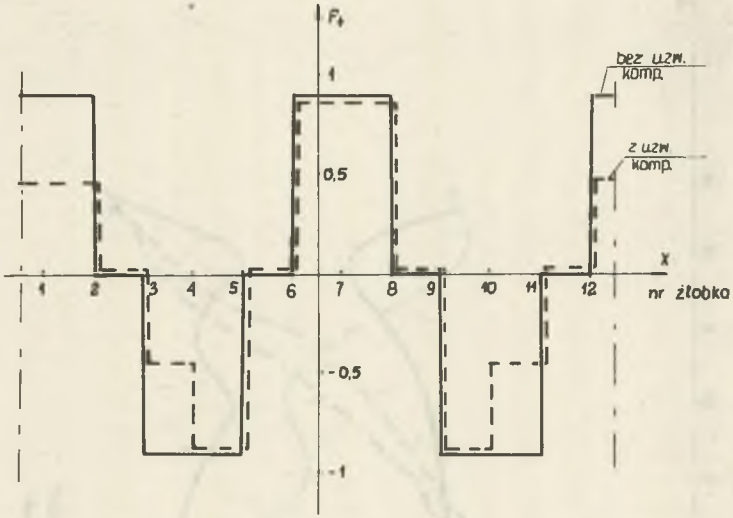
Przeprowadza się również próby z jednofazowymi cewkami kompensującymi obejmującymi jarzmo twornika. Cewki te znajdują się w ostatnich żłobkach i połączone są z fazą rozmieszczoną symetrycznie względem końców twornika.

Pomiary

Pomiary przeprowadzono dla dwóch silników liniowych SL-100 i SL-270 wykonanych w trzech wersjach: dla silnika nieskompensowanego, przy kompensacji uzwojeniem kompensacyjnym oraz przy kompensacji zwojem zwartym (Cu 8,75 mm^2). Badano rozkład pola magnetycznego w szczelinie silnika liniowego, zmiany mocy czynnej, pozornej, siły pociągowej, siły nacisku w funkcji natężenia prądu zasilającego przy stałej szczelinie mechanicznej dla bieżni ferromagnetycznej z nakładką aluminiową przy zahamowanym silniku oraz przebieg mocy czynnej, prędkości i siły pociągowej silnika w ruchu.

Ze względu na asymetrię prądów fazowych charakterystyki przedstawione są dla prądu średniego (średnia arytmetyczna). Moc czynną mierzono w układzie Arona. Siłę pociągową oraz siłę nacisku magnetycznego mierzono przy pomocy tensometrycznej metody pomiaru odkształceń. Indukcję magnetyczną w szczelinie mierzono przy użyciu czujnika Halla. Prędkość liniową mierzono przy użyciu prądniczki tachometrycznej napędzanej przez przekładnię pasową z koła jezdnego wózka.

Zamodelowano również obraz pola magnetycznego w szczelinie dla ik dobranych wartości prądów fazowych, przy których powstaje maksymalna wartość przepływu F_{bm}. Przebieg przepływów na długości twornika przy takich wartościach prądów fazowych przedstawia rys. 4.



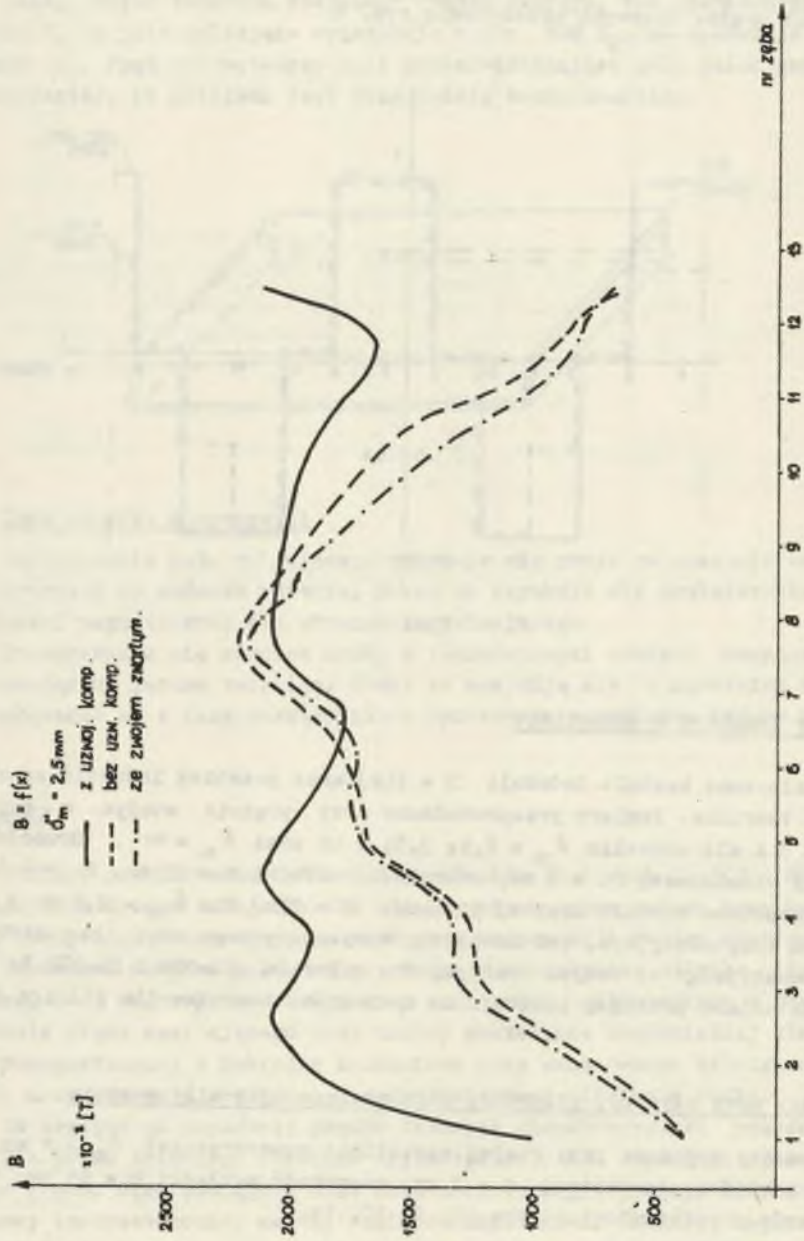
Rys. 4

Pomiar indukcji w szczelinie

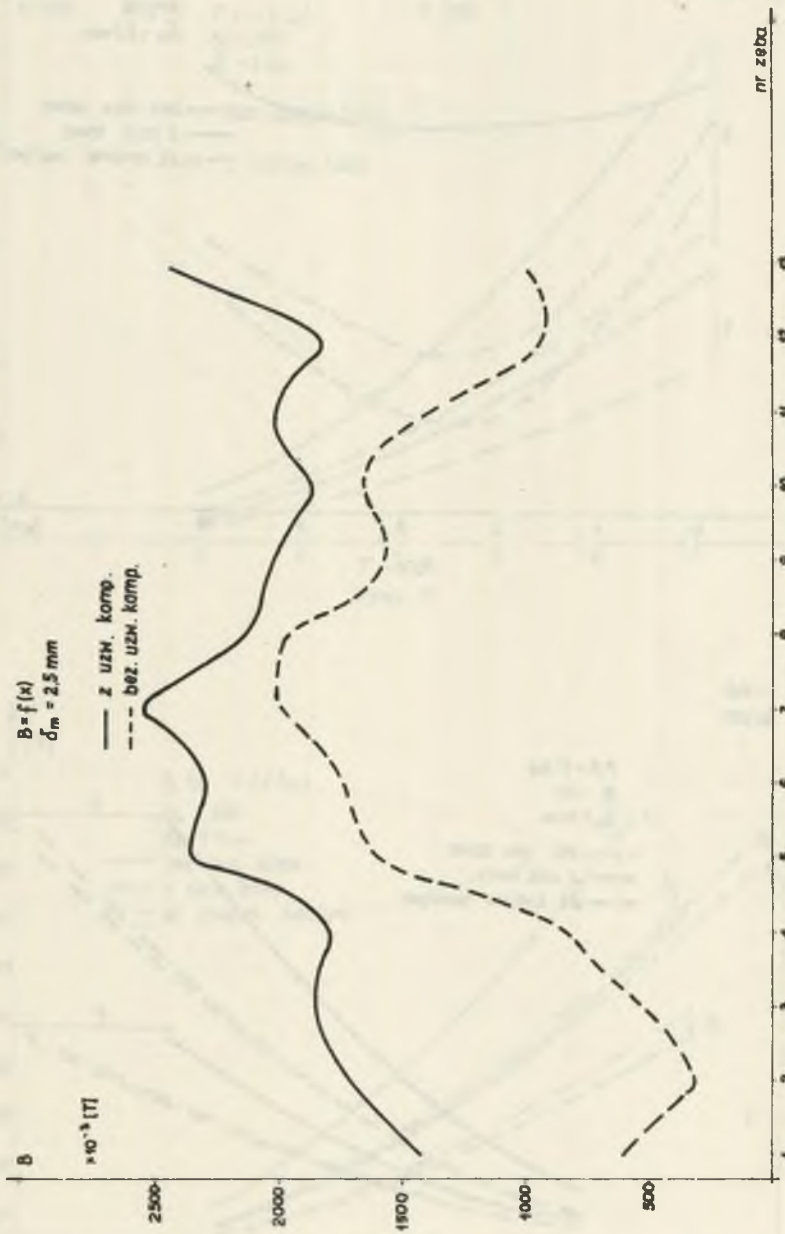
Pomierzono kształt indukcji B = f(x) oraz przebieg indukcji na szerokości twornika. Pomiary przeprowadzono przy prądzie stałym w tworniku I_{sr} = 3 A dla szczelin δ_m = 2,5; 3,5; 5 mm oraz $\delta_m = \infty$. Grubość nakładki aluminiowej a = 3 mm, szerokość nakładki b = 65 mm. Na rys.5 i 6 przedstawiono kształt krzywej indukcji B = f(x) dla δ_m = 2,5 mm z uzwojeniem kompensacyjnym, bez uzwojenia kompensacyjnego oraz bez uzwojenia kompensacyjnego ze zwojem zwartym, dla silników SL-100 i SL-270.Na rys.7 przedstawiono przebieg indukcji na szerokości twornika dla silnika SL-100.

Pomiary mocy czynnej, pozornej, siły pociągowej i siły nacisku

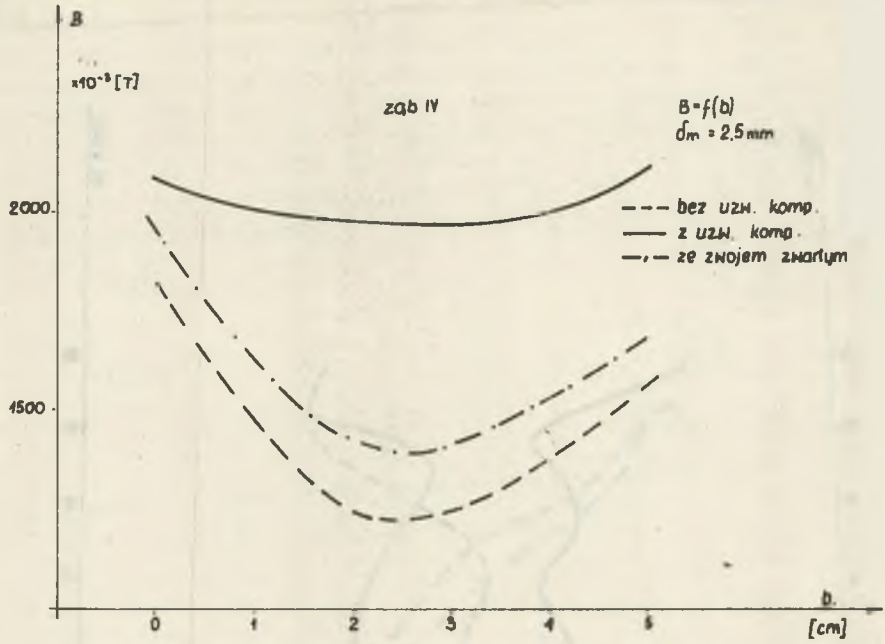
Pomiary wykonano przy stałej szczelinie geometrycznej δ_m = 1 mm. Grubość nakładki aluminiowej a = 3 mm, szerokość nakładki b = 65 mm. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 8, 9, 10, 11.


B = f(x)
δ_m = 2,5 mm
z uznaj. komp.
bez uzn. komp.
ze zwojem zwartym
B
$\times 10^{-3}$ [T]
2500
2000
1500
1000
500
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
w zęba

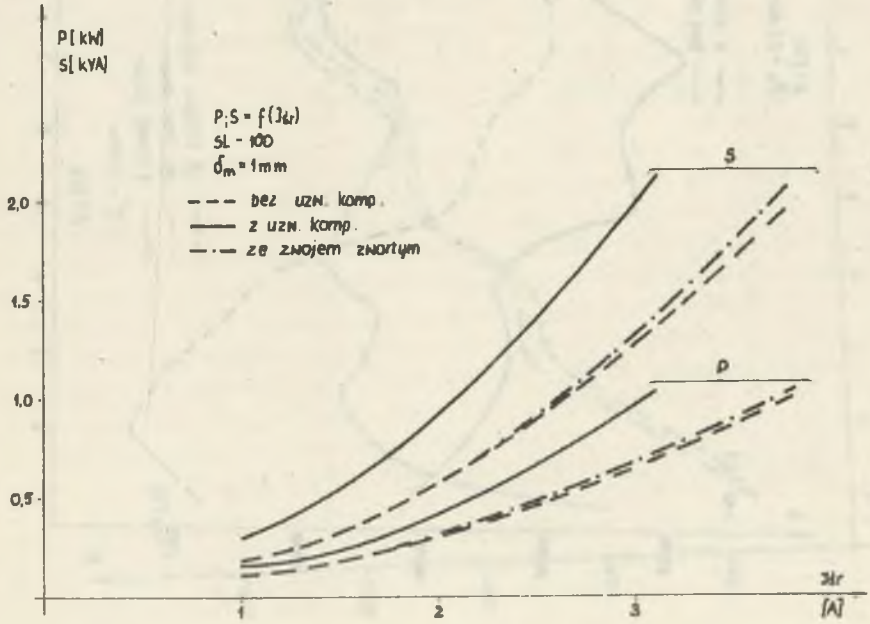
Rys. 5


B
×10⁻³ [T]
2500
2000
1500
1000
500
B=f(x)
δm = 2,5 mm
z uzw. komp.
bez. uzw. komp.
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
nr zęba

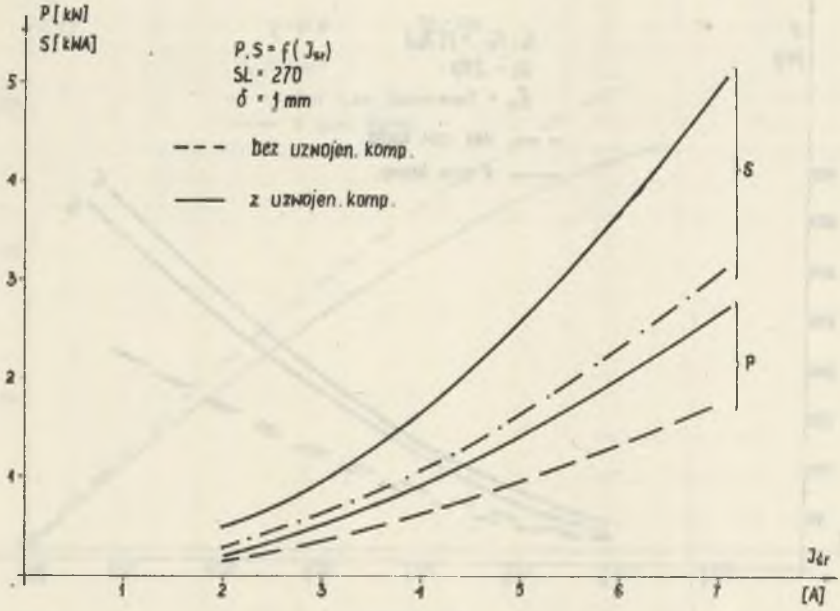
Rys. 6


B
×10⁻³ [T]
zab IV
B=f(b)
δm = 2,5 mm
2000
1500
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
ze zwojem zwartym
b.
0
1
2
3
4
5
[cm]

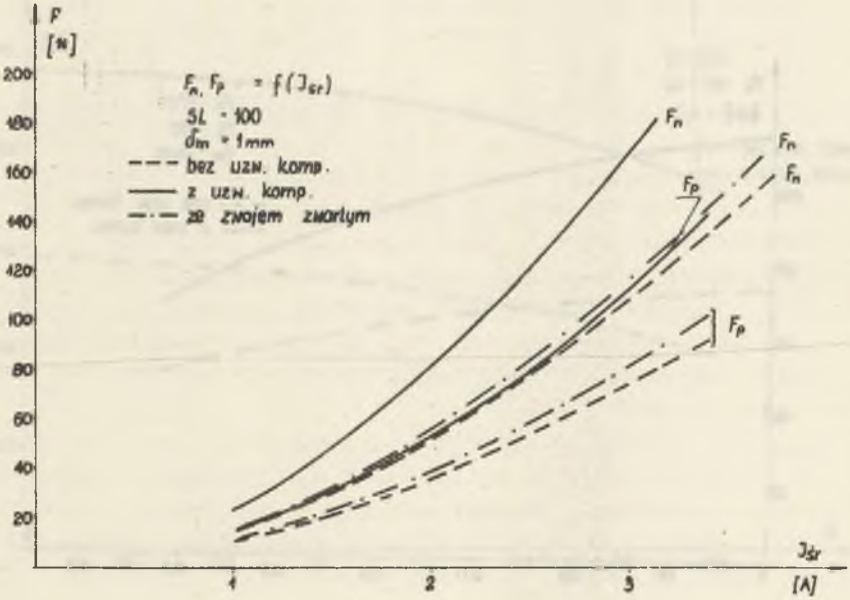
Rys. 7


P[kW]
S[kVA]
P;S = f(Jkr)
SL - 100
δm = 1mm
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
ze zwojem zwartym
S
P
2,0
1,5
1,0
0,5
Jkr
[A]
1
2
3

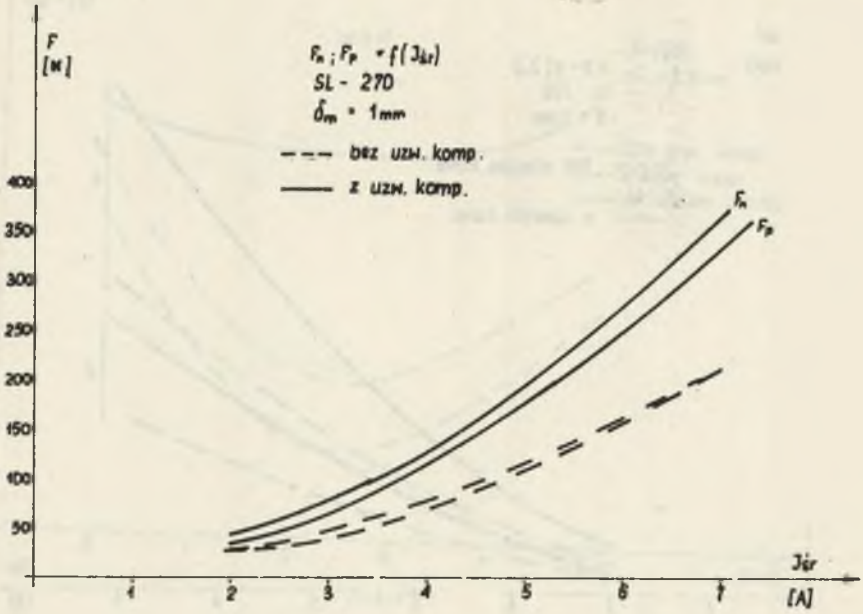
Rys. 8


P [kW]
S [kVA]
P, S = f(J_śr)
SL = 270
δ = 1 mm
bez uzwojen. komp.
z uzwojen. komp.
S
P
J_śr
[A]
1
2
3
4
5
6
7

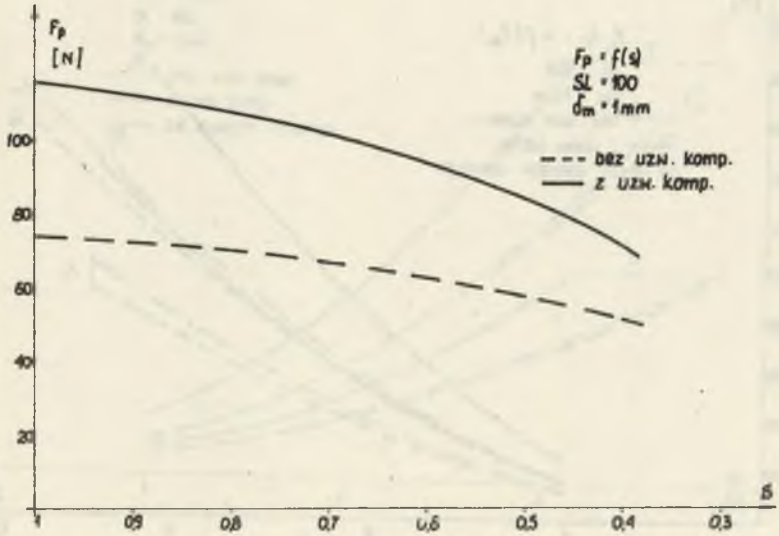
Rys. 9


F
[N]
F_n, F_p = f(J_śr)
SL = 100
δ_m = 1 mm
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
ze zwojem zwartym
F_n
F_p
J_śr
[A]
1
2
3

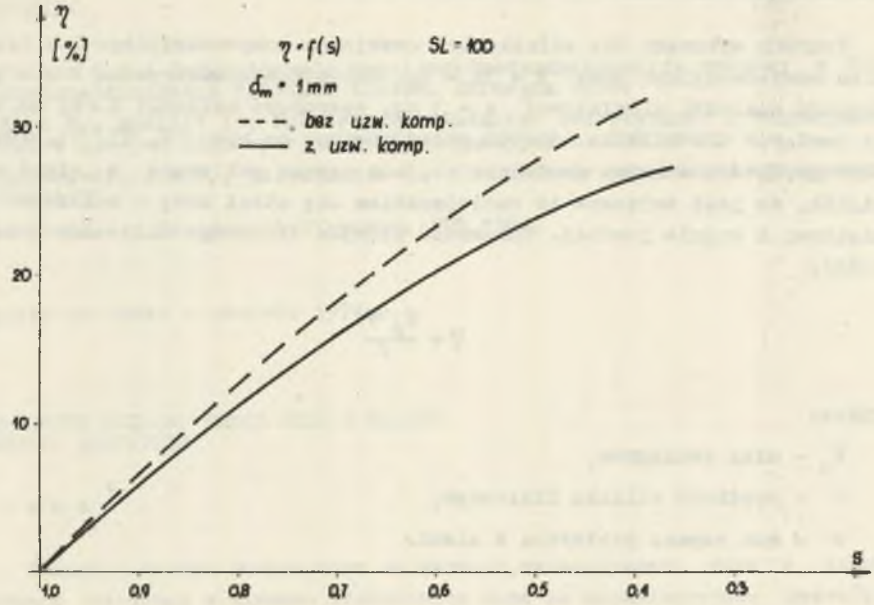
Rys. 10


F
[N]
F_n ; F_p = f($J_{śr}$)
SL - 270
δ_m = 1mm
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
F_n
F_p
400
350
300
250
200
150
100
50
1
2
3
4
5
6
7
$J_{śr}$
[A]

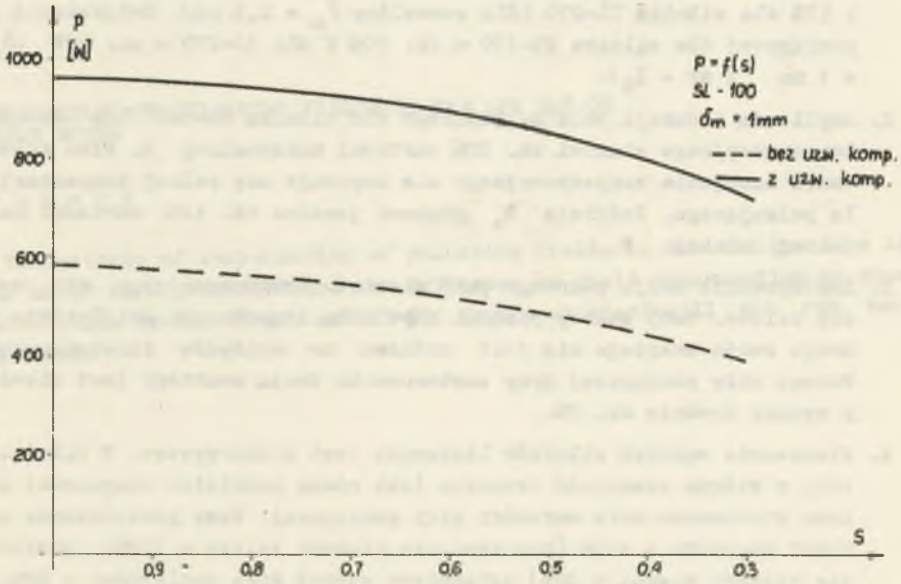
Rys. 11


F_p
[N]
F_p = f(s)
SL = 100
δ_m = 1mm
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
100
80
60
40
20
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
s

Rys. 12


η
[%]
η = f(s)
SL = 100
d_m = 1mm
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
30
20
10
s
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3

Rys. 13


P
[W]
P = f(s)
SL - 100
δ_m = 1mm
bez uzw. komp.
z uzw. komp.
1000
800
600
400
200
s
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3

Rys. 14

Pomiary parametrów silnika liniowego w ruchu

Pomiary wykonano dla silnika bez uzwojenia kompensacyjnego i z uzwojeniem kompensacyjnym przy $I = 3A = I_N$. Szczelina geometryczna $\delta_m = 1$ mm. Grubość nakładki aluminiowej $a = 3$ mm, szerokość nakładki $b = 65$ mm. Wyniki pomiarów dla silnika SL-100 przedstawiono na rys. 12, 13, 14. Przy wzroście prędkości silnika zmniejsza się moc czynna pobierana z sieci przez silnik, co jest związane ze zmniejszaniem się strat mocy w nakładce aluminiowej i szynie jezdnej. Sprawność silnika liniowego obliczono z zależności:

$$\eta = \frac{F_p v}{P}$$

gdzie:

F_p - siła pociągowa,

v - prędkość silnika liniowego,

P - moc czynna pobierana z sieci.

Wnioski

1. Uzwojenie kompensacyjne w silniku liniowym powoduje zwiększenie wartości średniej indukcji w szczelinie silnika o ok. 30% dla silnika SL-100 i 57% dla silnika SL-270 (dla szczeliny $\delta_m = 2{,}5$ mm). Zwiększenie siły pociągowej dla silnika SL-100 o ok. 50% i dla SL-270 o ok. 60% ($\delta_m = 1$ mm $I_{śr} = I_N$).
2. Amplituda indukcji pola pulsującego dla silnika SL-100 bez uzwojenia kompensacyjnego stanowi ok. 50% wartości maksymalnej B. Mimo zastosowania uzwojenia kompensacyjnego nie uzyskuje się pełnej kompensacji pola pulsującego. Indukcja B_c stanowi jeszcze ok. 14% wartości maksymalnej indukcji B.
3. Zastosowanie zwoju zwartego jako elementu kompensacyjnego nie wydaje się celowe. Zwój zwarty posiada zbyt dużą rezystancję. Zwiększenie przekroju zwoju zwartego nie jest możliwe ze względów konstrukcyjnych. Wzrost siły pociągowej przy zastosowaniu zwoju zwartego jest niewielki i wynosi średnio ok. 7%.
4. Stosowanie wąskich silników liniowych jest niekorzystne. W silniku SL-100, w którym szerokość twornika jest równa podziałce biegunowej uzyskano stosunkowo małe wartości siły pociągowej. Przy powiększeniu szerokości twornika o 100% (powiększenie ciężaru żelaza o 100%, powiększenie ciężaru miedzi o 30%) osiągnięto wzrost siły pociągowej o 90%.

LITERATURA

[1] Woldek A.N.: Indukcjonnyje magnitogidrodynamiczeskije masziny s żidkomietałłiczeskim raboczim tiełom. Eniergia 1970.

[2] Kant M., Moullit A., Schuer J.M.: Badania teoretyczne i eksperymentalne uzwojeń liniowych silników indukcyjnych. RGE 1971.

[3] Sabonnediere J.C., Poloujadoff M.: Charakterystyka efektu brzegowego. RGE 1971.

[4] Dubicki J.: Maszyny elektryczne. PWN 1964.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

КОМПЕНСАЦИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Р е з ю м е

Изложены методы компенсации магнитного пульсирующего поля в зазоре линейного двигателя и влияние компенсации поля на характеристики двигателй СЛ-100 и СЛ-270 в неподвижном состоянии и во время движения.

COMPENSATION OF PULSATING FIELDS IN THE AIR GAP OF LINEAR MOTOR

S u m m a r y

The methods of compensation of pulsating fields in the air gap of a linear motor were presented and the influence of field compensation on characteristics of the SL-100 and SL-270 motors at standstill and run was discussed.