

Emil Kupiec, Włodzimierz Przyborowski
Politechnika Warszawska, Zakład Maszyn Elektrycznych

METODA WYZNACZANIA I ANALIZA ROZKŁADU INDUKCJI MAGNETYCZNEJ W SZCZELINIE POWIETRZNEJ SILNIKA INDUKCYJNEGO LINIOWEGO

METHOD FOR DETERMINING AND ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL AIR GAP FLUX DENSITY IN LINEAR INDUCTION MOTOR

Streszczenie: W pracy przedstawiono system pomiarowy oraz metodę wyznaczania przestrzennego rozkładu indukcji w szczelinie silnika indukcyjnego liniowego. Opisano sposób rejestracji czasowo-przestrzennego rozkładu indukcji. Zaprezentowano metodę przekształcenia sygnałów pomiarowych i ich analizę w celu wyznaczenia przestrzennego rozkładu indukcji oraz wyznaczenia harmonicznych przestrzennych. Na podstawie wprowadzenia parametrycznej zmienności czasu w formie kąta fazowego dokonano wizualizacji pomierzonych sygnałów w formie animacji przebiegu czasowo-przestrzennego.

Abstract: In this work a measurement system and method for calculating the spatial air gap field distribution in linear induction motor is presented. Way of recording the instantaneous air gap flux density distribution is described. Method of converting the measured signals to obtain the spatial air gap flux density distribution and spatial harmonics is presented. Based on the introduction of parametric variation of time in the form of phase angle, the animation of instantaneous air gap field distribution was generated.

Słowa kluczowe: indukcja magnetyczna, silnik indukcyjny liniowy

Keywords: flux density, linear induction motor

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania konstruktorów napędami z zastosowaniem silników liniowych. Spowodowane jest to wytwarzaniem przez nie sił w ruchu liniowym bez pośrednictwa przekładni, co przekłada się na prostszą budowę układu napędowego i większą niezawodność. Możliwe jest także uzyskanie większych przyspieszeń niż w układach napędowych z silnikami obrotowymi z przełożeniem na ruch liniowy. Silniki liniowe jednak cechują się mniejszą sprawnością przetwarzania energii w porównaniu z maszynami obrotowymi.

Projektowanie optymalnych konstrukcji silników liniowych stanowi duże wyzwanie dla konstruktorów. Pomocne są w tym zakresie działań klasyczne metody analityczne i metody obliczeń polowych. Ze względu jednak na przyjmowane w obliczeniach założenia upraszczające związane z otwartością obwodu magnetycznego i ograniczoną długością wzbudników silników liniowych, nieodzowna jest pomiarowa weryfikacja metod projektowych. Najczęściej wykonywane badania obejmują wyznaczenie charakterystyk eksploatacyjnych w stanie zwarcia, biegu jałowego, a także obciążenia. Rzadziej natomiast wyko-

nuje się pomiary indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika, która stanowi podstawową wielkość fizyczną wielu procedur obliczania parametrów całkowitych maszyn elektrycznych. W artykule przedstawiono metodę (zarówno pod względem instrumentalnym jak również metodycznym) pomiaru rozkładu przestrzennego indukcji w szczelinie silnika indukcyjnego liniowego. Wyniki i analiza rozkładu indukcji stanowi podstawę do weryfikacji współczynników stosowanych w klasycznych metodach projektowania lub weryfikacji modelu polowego maszyny.

2. Metody wyznaczania przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej

Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika indukcyjnego obrotowego, a także liniowego w strefie dostatecznie odległej od jego krańców, jest opisywany zależnością [1]:

$$b(t, x) = \sum_{l=1} \sum_{n=1} B_{mnl} \sin(\lambda_n \xi - \omega_l t + \varphi_{nl}) \quad (1)$$

gdzie:

ξ - współrzędna wzdłuż szczeliny powietrznej, kierunku propagacji pola magnetycznego,

λ_n - liczba falowa $\lambda_n = \frac{\pi}{\tau_m} n$, $n = 0, \pm 1, \dots$,

τ_m - podziałka biegunowa,

ω_l - częstość l -tej harmoniczej czasowej,

φ_{nl} - kąt fazowy n -tej harmoniczej przestrzennej i l -tej harmoniczej czasowej.

Pomiar chwilowego przebiegu indukcji $b(t)$ w wybranym punkcie szczeliny powietrznej silnika liniowego nie stanowi większego problemu, poza dobraniem właściwego czujnika. Natomiast wyznaczenie rozkładu przestrzennego $b(x)$ dla ustalonego t jest już większym problemem. W sposób bezpośredni można to zrobić umieszczając czujniki indukcji w wielu punktach drogi pomiarowej i rejestrując ich sygnał w ustalonej chwili czasowej. Metoda ta pozwala na uzyskanie dokładnego wyniku, ale jest bardzo złożona i kosztowna. Dlatego też zostały opracowane metody, które dzięki wykorzystaniu okresowości funkcji $b(x,t)$ względem czasu t , umożliwiają wyznaczenie rozkładu przestrzennego indukcji na podstawie sygnału z jednego przemieszczającego się czujnika.

Pierwsza z nich zakłada, że prądy w poszczególnych pasmach fazowych zawierają tylko pierwszą harmoniczną i są symetryczne, zaś składowa normalna indukcji w szczelinie powietrznej jest skutkiem działania tych prądów. Zatem wybraną chwilę czasową symuluje się zasilając pasma prądem stałym o wartościach wynikających z wybranej chwili czasowej danego układu trój- lub wielofazowego [1, 2]. Natomiast rozkład przestrzenny indukcji jest rejestrowany za pomocą sondy przemieszczającej się wzdłuż drogi pomiarowej i zapisywany w postaci $b(x)$. Metoda ta pozwala na stosunkowo proste wyznaczenie poszukiwanego rozkładu, jednakże jest obciążona dużym błędem ze względu na pomijanie wielu zjawisk występujących przy zasilaniu silników indukcyjnych prądem przemiennym, a w szczególności oddziaływania prądów w części wtórnej i prądów wirowych w rdzeniu stojana. W drugiej metodzie [1] zakłada się, że badany rozkład indukcji jest funkcją okresową względem czasu, zatem rozkład przestrzenny w chwilach odległych o całkowitą wielokrotność okresu T jest identyczny. Pozwala to na próbkowanie sygnału z czujnika indukcji w chwilach czasowych odległych o całkowitą liczbę okresów T , ale w różnych położeniach. Dzięki czemu jest możliwe wyznaczenie rozkładu przestrzennego dla ustalonej chwili czasowej t_i

lub równoważnej jej fazie φ_i w okresie zmienności prądu.

Wyznacza się również tzw. obwiednię indukcji, czyli rozkładu wartości ekstremalnych indukcji magnetycznej przy zasilaniu prądem przemiennym [1]. Polega to na rejestracji sygnału w funkcji położenia sondy przemieszczającej się z małą prędkością w szczelinie powietrznej badanej maszyny. Następnie z tak uzyskanego przebiegu indukcji wybiera się punkty odpowiadające maksymalnym wartościom w poszczególnych okresach napięcia i tworzy się z nich zależność $b_M(x)$ stanowiącą obwiednię.

3. Procedura wyznaczenia przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej

Rozkład czasowo-przestrzenny indukcji w szczelinie SIL jest określony zależnością (1) w środkowej części wzbudnika. Natomiast na krańcach silnika do funkcji (1) dołączany jest czynnik multiplikatywny określony funkcją wykładniczą zmiennej x , odpowiadający za zanikanie pola magnetycznego poza obszarem wzbudnika. Niemniej jednak zależność opisująca ten rozkład na całej długości szczeliny powietrznej, wobec okresowości wymuszenia względem t , jest funkcją okresową względem czasu t z okresem T :

$$b(x, \omega t) = b(x, \omega(t + T)) \quad (2)$$

W celu zbadania tego rozkładu umieszcza się w szczelinie powietrznej pomiarową sondę hallotronową, ustawiając ją w m punktach na drodze pomiarowej. W każdym z punktów rejestruje się wartość $b_i = b(x_i, \varphi^*)$ indukcji magnetycznej występującej w chwili t odpowiadającej wybranemu kątowi φ^* liczonemu od przejścia prądu fazy A przez zero. Zestawiając wartości b_i, x_i w wektory:

$$b_\varphi = [b(x_1, \varphi^*) \quad b(x_2, \varphi^*) \quad \dots \quad b(x_m, \varphi^*)] \quad (3)$$

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m] \quad (4)$$

otrzymuje się rozkład przestrzenny indukcji chwilowej określony w punktach x_i dla ustalonego φ^* .

Po wprowadzeniu dodatkowych warunków wyzwalania rejestracji, w celu ustalenia jednoznaczności pomiarów, jest możliwe wyznaczenie przestrzennych rozkładów indukcji dla silników indukcyjnych z bieźnikami (wirnikami) uzębionymi [3].

Powyższa metoda pozwala na wyznaczenie poszukiwanego rozkładu, aby jednak uzyskać dobrą rozdzielczość liniową trzeba przepro-

wadzić dużą liczbę rejestracji, zachowując jednakowe parametry warunków pomiaru. Zwłaszcza napięcie zasilania i temperaturę uzwojeń. Utrzymanie stałości temperatury uzwojeń badanej maszyny jest szczególnie trudne w przypadku pomiarów w stanie zwarcia, ponieważ zatrzymanie bieźnika znacząco utrudnia oddawanie ciepła do otoczenia. Z drugiej strony w tym przypadku, jak również przy współpracy z bieźniami warstwowymi w ruchu, przewodność magnetyczna szczeliny powietrznej jest stała w czasie. Zatem do wyznaczenia rozkładu $b(x)$ można użyć innej metody [1].

W szczelinie powietrznej umieszcza się sondę pomiarową przemieszczając ją wzdłuż wzbudnika z prędkością v_s , znacznie mniejszą od prędkości synchronicznej pola magnetycznego w badanym obszarze. Jednocześnie rejestruje się, ze stałym krokiem czasowym T_p , sygnał proporcjonalny do $b(x,t)$ oraz $x(t)$ (położenie) tworząc wektory:

$$b = [b(t_1) \quad b(t_2) \quad \dots \quad b(t_{m-k})] \quad (5)$$

$$x = [x(t_1) \quad x(t_2) \quad \dots \quad x(t_{m-k})] \quad (6)$$

przy czym: $T = kT_p$

$b(t_i)$ – wartość indukcji w chwilach t_i i położeniu sondy $x(t_i)$.

Następnie formułuje się macierze:

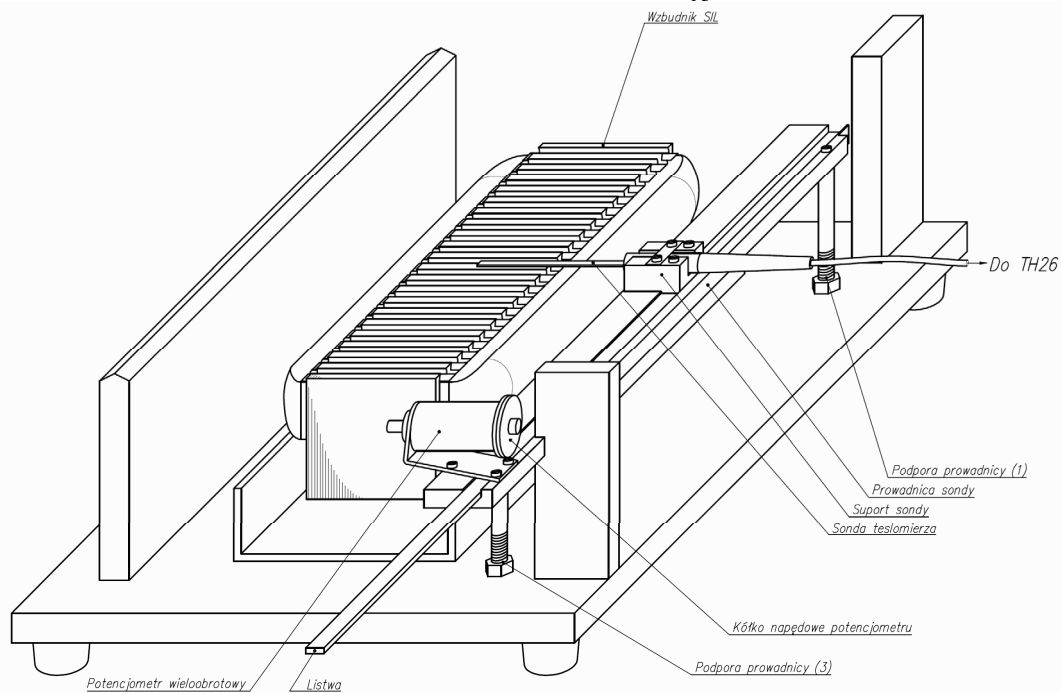
$$B = \begin{bmatrix} b(t_1) & b(t_2) & \dots & b(t_k) \\ b(t_{k+1}) & b(t_{k+2}) & \dots & b(t_{2k}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b(t_{(m-1)k+1}) & b(t_{(m-1)k+2}) & \dots & b(t_{m-k}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$X = \begin{bmatrix} x(t_1) & x(t_2) & \dots & x(t_k) \\ x(t_{k+1}) & x(t_{k+2}) & \dots & x(t_{2k}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(t_{(m-1)k+1}) & x(t_{(m-1)k+2}) & \dots & x(t_{m-k}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Zastępując zmienną t przez parametr $\varphi = (t - E[t/T]T)\omega$, otrzymuje się w kolumnach macierzy B wartości przestrzennego rozkładu indukcji, dla stałych kątów fazowych φ_i , odpowiadające położeniom zdefiniowanym w kolumnach macierzy X .

$$B = \begin{bmatrix} b(\varphi_1) & b(\varphi_2) & \dots & b(\varphi_k) \\ b(\varphi_1) & b(\varphi_2) & \dots & b(\varphi_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b(\varphi_1) & b(\varphi_2) & \dots & b(\varphi_k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

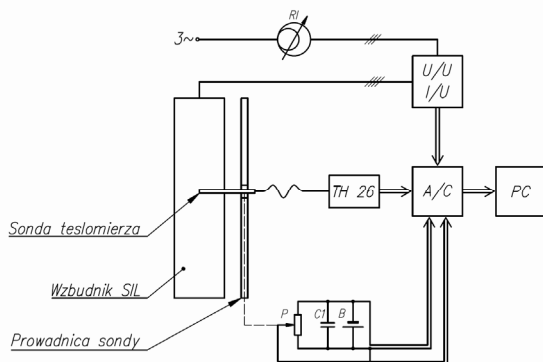
Postępując według tej metody wyznacza się przestrzenny rozkład indukcji dla k kątów fazowych za pomocą jednej rejestracji z krokiem kwantyzacji położenia $\Delta x = v_s T$. Należy zaznaczyć, że położenia, w których zostały określone wartości poszczególnych rozkładów, nie są jednakowe.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego ze zdemontowaną bieźnią

4. Realizacja pomiaru

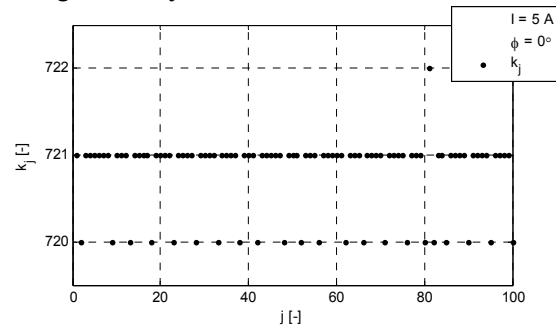
Pomiar rozkładu czasowo-przestrzennego indukcji wykonano w silniku indukcyjnym liniowym (SIL) jednostronnym z bieżnią warstwową, zaprojektowanym do napędu laboratoryjnego modelu wagonika systemu transportu publicznego o charakterze indywidualnym (PRT- Personal Rapid Transit) [4]. W tym celu na stanowisku do pomiarów sił ciągu i naciągu (rys. 1), zamontowano prowadnicę, po której przemieszcza się sondę pomiarową teslomierza, umieszczoną w szczelinie powietrznej silnika. Sygnał proporcjonalny do chwilowej wartości indukcji, po wstępnej obróbce w teslomierzu, jest rejestrowany wraz z sygnałami prądu fazy A i położenia za pomocą karty przetworników A/C sterowanej przez program napisany w środowisku LabVIEW. Schemat ideowy tego systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



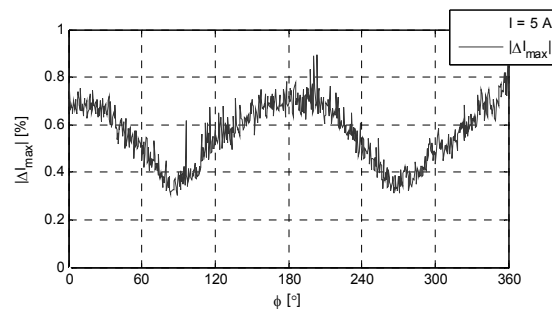
Rys. 2. Schemat systemu pomiarowego

Zarejestrowane przebiegi prądu, indukcji i położenia sondy poddano analizie za pomocą programu napisanego w środowisku Matlab zgodnie z przedstawioną powyżej procedurą. Ze względu na obecność zakłóceń, szczególnie w sygnale opisującym położenie, zastosowano filtrację w postaci uśredniania zarejestrowanych przebiegów przed wyznaczeniem rozkładu przestrzennego indukcji. Ponadto sieciowe napięcie zasilania wykazywało pewną dynamiczną niestalość częstotliwości, uniemożliwiającą zastosowanie korekcji liniowej stosunku f/f_p dla całego wektora pomiarowego obejmującego 15s rejestracji. Dlatego przy podziale wektorów X i B na okresy T względem przebiegu prądu fazy A , wprowadzono procedurę normalizacji długości okresu polegającą na obcięciu nadmiarowej próbki lub uzupełnieniu niedomiarowej kolejną zarejestrowaną (rys. 3).

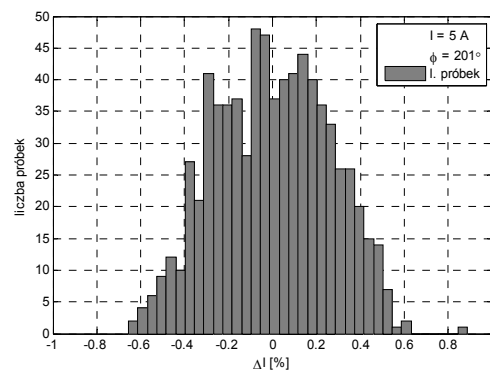
W wyniku zastosowania normalizacji długości okresu, powodującej maksymalny błąd określenia kąta fazowego φ o wartości $0,5^\circ$, oraz wskutek fluktuacji napięcia zasilania, występuje błąd określenia wartości prądu. Przebieg tego błędu przedstawiono na rysunku 4 a jego histogram na rysunku 5.



Rys. 3. Wyznaczona długość okresu k_j przed normalizacją



Rys. 4. Zależność maksymalnego błędu określenia wartości prądu od kąta fazowego φ



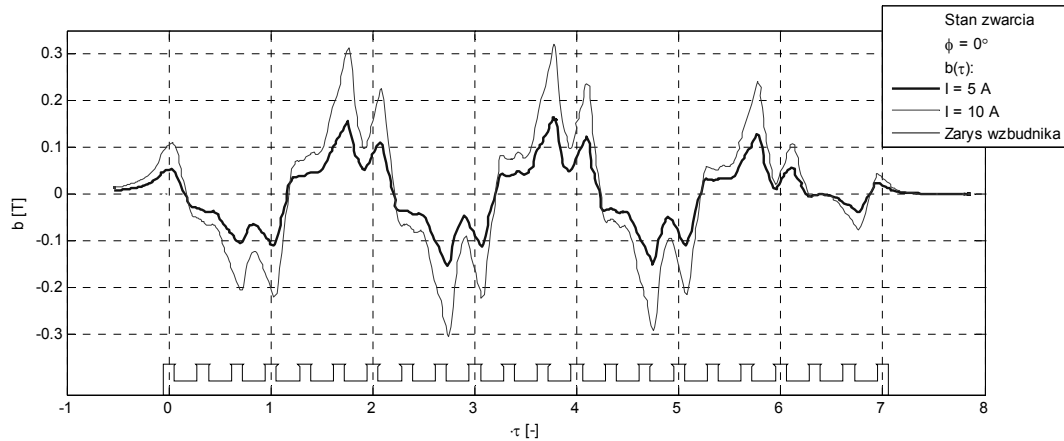
Rys. 5. Przykładowy histogram błędu określenia wartości prądu dla $\varphi=201^\circ$

5. Wyniki i analiza pomiarów

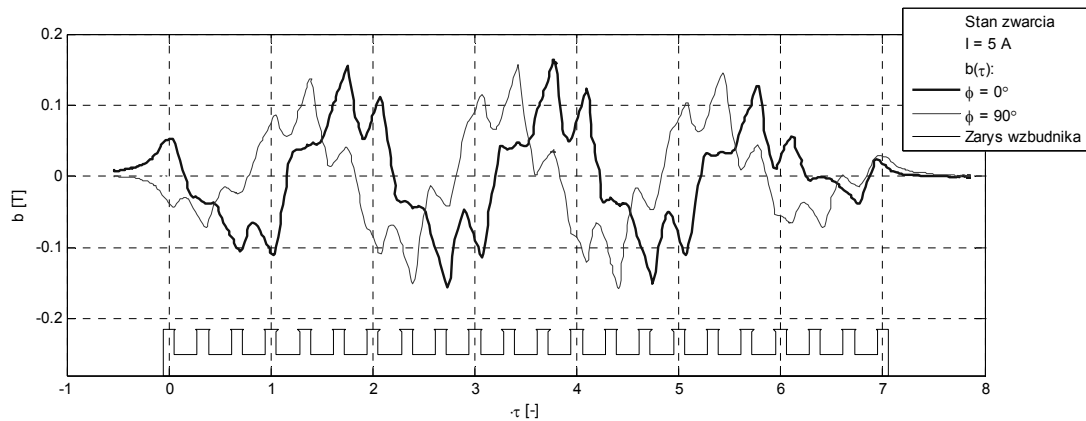
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono rozkłady przestrzenne indukcji w szczelinie SIL dla wybranych wartości I i φ uzyskane opisaną metodą. Jak stwierdzono powyżej z jednej rejestracji indukcji uzyskuje się macierz opisującą rozkłady przestrzenne $b(x)$ dla k kątów fazowych. Zapisując kolejne rozkłady w pli-

kach graficznych o identycznie sformatowanym układzie współrzędnych, można, przy użyciu prostego programu do tworzenia animacji, wygenerować wizualizację przemiesz-

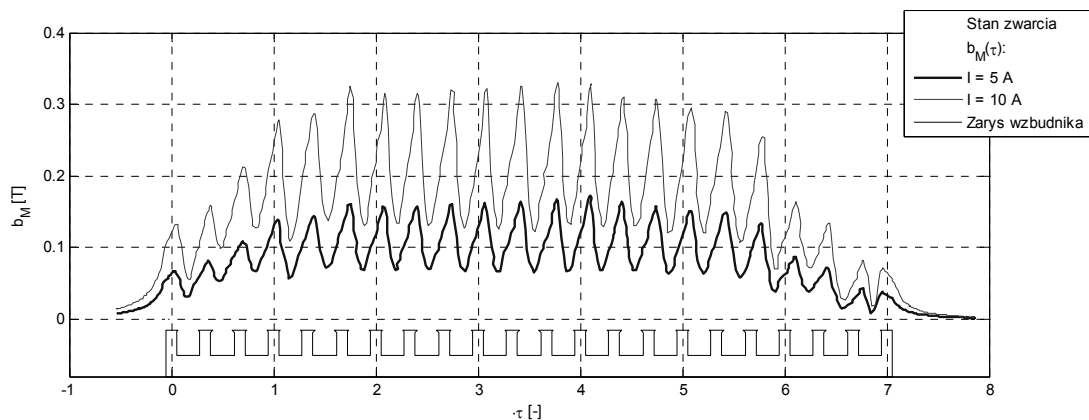
czania się fali pola magnetycznego wzdłuż drogi pomiarowej w szczelinie powietrznej badanego silnika.



Rys. 6. Rozkład przestrzenny indukcji w szczelinie SIL dla $\varphi=0^\circ$ i prądów pasma fazowego 5 i 10 A



Rys. 7. Rozkład przestrzenny indukcji w szczelinie SIL dla prądu pasma fazowego $I=5$ A



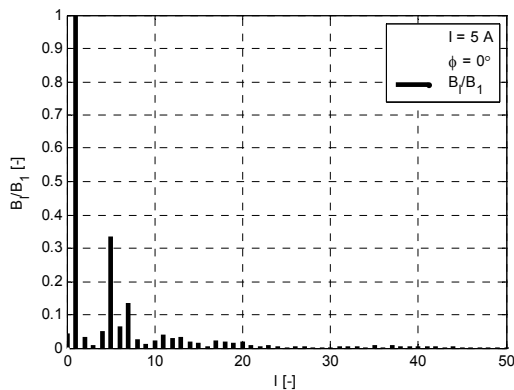
Rys. 8. Obwiednia indukcji w szczelinie SIL dla prądów pasma fazowego $I=5$ A i $I=10$ A

Na podstawie zarejestrowanych danych wyznaczono także obwiednię indukcji $b_M(x)$ przedstawioną na rysunku 8. Kolejne punkty tego wykresu są określone przez maksymalne wartości modułu indukcji w poszczególnych j -tych wierszach macierzy B oraz odpowiada-

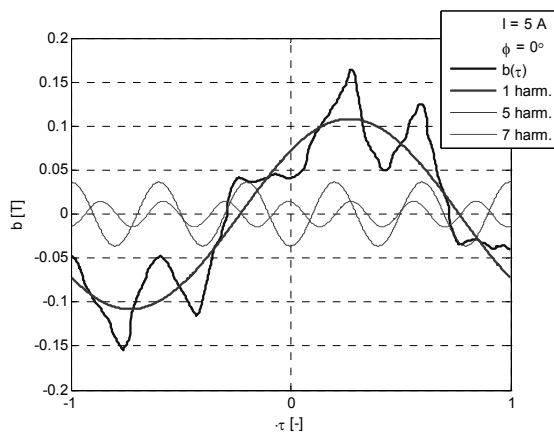
jące im położenia z macierzy X .

Dla przedziału zmiennej x o długości dwóch podziałek biegunowych wybranego ze środka drogi pomiarowej, dokonano rozkładu na harmoniczne przestrzenne przebiegu $b(x)$ dla ustalonych φ . Przed tą operacją zastosowano

ponowne próbkowanie przebiegu indukcji z interpolacją liniową w celu uzyskania stałego kroku Δx wymaganego przez zastosowaną procedurę szybkiej transformaty Fouriera. Uzyskany rozkład harmonicznych przestrzennych przedstawiono na rysunku 9 a na rysunku 10 zaprezentowano rzeczywisty rozkład przestrzenny indukcji oraz jego znaczące harmoniczne. Na podstawie jednej rejestracji wyznacza się k takich rozkładów, zatem tak jak w przypadku przebiegów przedstawionych na rysunku 7, można stworzyć animację przedstawiającą przemieszczanie się fali pola magnetycznego oraz jej podstawowych harmonicznych na długości analizowanego przedziału zmiennej x .



Rys. 9. Amplitudy kolejnych harmonicznych przestrzennych przebiegu indukcji $b(x)$, na długości 2τ w środku przedziału pomiarowego, dla $I=5\text{ A}$, $\varphi=0^\circ$



Rys. 10. Rzeczywisty przebieg $b(x)$ oraz znaczące harmoniczne przestrzenne wyznaczone na długości 2τ w środku przedziału pomiarowego dla $I=5\text{ A}$, $\varphi=0^\circ$

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę pomiarowego wyznaczania przestrzennego rozkładu indukcji

magnetycznej w szczelinie silnika indukcyjnego liniowego. Opisano metodykę opracowywania zarejestrowanych sygnałów i ich analizy w zakresie formy harmonicznych przestrzennych. Metoda ta charakteryzuje się stosunkowo krótkim czasem rejestracji i pozwala uzyskać, przy jednokrotnym przemieszczeniu sondy wzdłuż drogi pomiarowej, przestrzenne rozkłady indukcji dla k kątów fazowych. Przy czym jej rozdzielczość kątowa jest wprost proporcjonalna do T_p/T , zaś rozdzielczość liniowa – do $\frac{1}{v_s T}$.

7. Literatura

- [1] Kamiński G., Biernat A., Szczypior J.: *Metoda pomiaru rozkładu przestrzennego wartości chwilowej indukcji magnetycznej w szczelinie maszyn elektrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny vol. 58 z. 8-9, 1982, s. 210-213
- [2] Rogalski A., Pochanke A., Bieńkowski K.: *Rozkład indukcji magnetycznej szczelinie powietrznej silnika indukcyjnego wielofazowego*. XL Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych 15-18 czerwca 2004. Hajnówka.
- [3] Kamiński G., Szczypior J., Biernat A.: *Metoda pomiarowa identyfikacji parametrów elektromagnetycznych maszyny indukcyjnej*. Zeszyty Naukowe AGH; Elektrotechnika z. 12, Kraków 1988, s. 157-169
- [4] Kamiński G., Herbst A.: *Porównanie wyników elektromagnetycznych obliczeń połowych 2D i 3D dla jednostronnego indukcyjnego silnika liniowego*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 93, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 109-112

Artykuł współfinansowany z pracy ECO-Mobilność WND-POIG.01.03.01-14-154/09.



INNOWACYJNA
GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Autorzy

mgr Emil Kupiec,
E-mail: kupiece@ee.pw.edu.pl
dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski
E-mail: W.Przyborowski@ime.pw.edu.pl
Instytut Maszyn Elektrycznych,
Politechnika Warszawska,
00-662 Warszawa, Plac Politechniki 1.

Recenzent

prof. dr hab. inż. Tomasz Trawiński