

Leszek LISOWSKI

Instytut Elektryfikacji
i Automatykacji Górnictwa
Politechniki Śląskiej

PROCEDURA PROJEKTOWANIA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH ZAWIERAJĄCYCH CZĘSTOTLIWOŚCIOWO STEROWANY SILNIK LINIOWY

Streszczenie. W artykule przedstawiono procedurę pierwszego etapu projektowania układów napędowych zawierających częstotliwościowo sterowany indukcyjny silnik liniowy. Etap ten polega na wyborze podstawowych parametrów układu decydujących o własnościach statycznych.

1. UWAGI WSTĘPNE

Najbardziej efektywnym sposobem rozwiązania głównych problemów aplikacyjnych indukcyjnego, płaskiego silnika liniowego (SIL), tzn. powiększenia sprawności przetwarzania energii oraz współczynnika mocy, jest zastosowanie częstotliwościowego sterowania prędkością posuwu, jak również odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych elementów składowych układu napędowego. Szerokie możliwości zastosowania tego typu sterowania wynikają z szybkiego rozwoju badań i rozwiązań konstrukcyjnych półprzewodnikowych przekształtników częstotliwości.

Ze względu na złożoność i dokładność modelu matematycznego określającego własności dynamiczne SIL [1] proces projektowania układów napędowych należy rozdzielić na dwa etapy. Pierwszy, który stanowi treść artykułu, polega na doborze podstawowych parametrów decydujących o własnościach statycznych układu. Natomiast zadaniem drugiego jest wybór parametrów i struktury układu automatycznej regulacji prędkości posuwu.

Cel pierwszego etapu projektowania można sformułować następująco: zadaniem projektanta, który mając do dyspozycji szereg produkowanych induktorów silnika liniowego oraz układów zasilających jest taki wybór zmiennych deey-

zyjnych i układu zasilającego, aby układ napędowy w sposób optymalny realizował postawione zadanie napędowe.

Jako kryterium optymalizacyjne proponuje się przyjęcie minimalizacji energii elektrycznej czynnej i biernej oraz nakładów inwestycyjnych.

Proces projektowania układów napędowych zawierających SIL jest w stosunku do maszyn wirujących bardziej złożony. Złożoność ta wynika z faktu, że SIL produkowany jest i sprzedawany w postaci gotowych induktorów a projektant układu poprzez dobór parametrów części wtórnej, struktury i algorytmu sterowania częstotliwościowego określa własności całego silnika. Katalogi firmowe zawierają tylko charakterystyki statyczne dla określonej struktury i konstrukcji bieźni oraz częstotliwości napięcia zasilania $f = 50$ Hz.

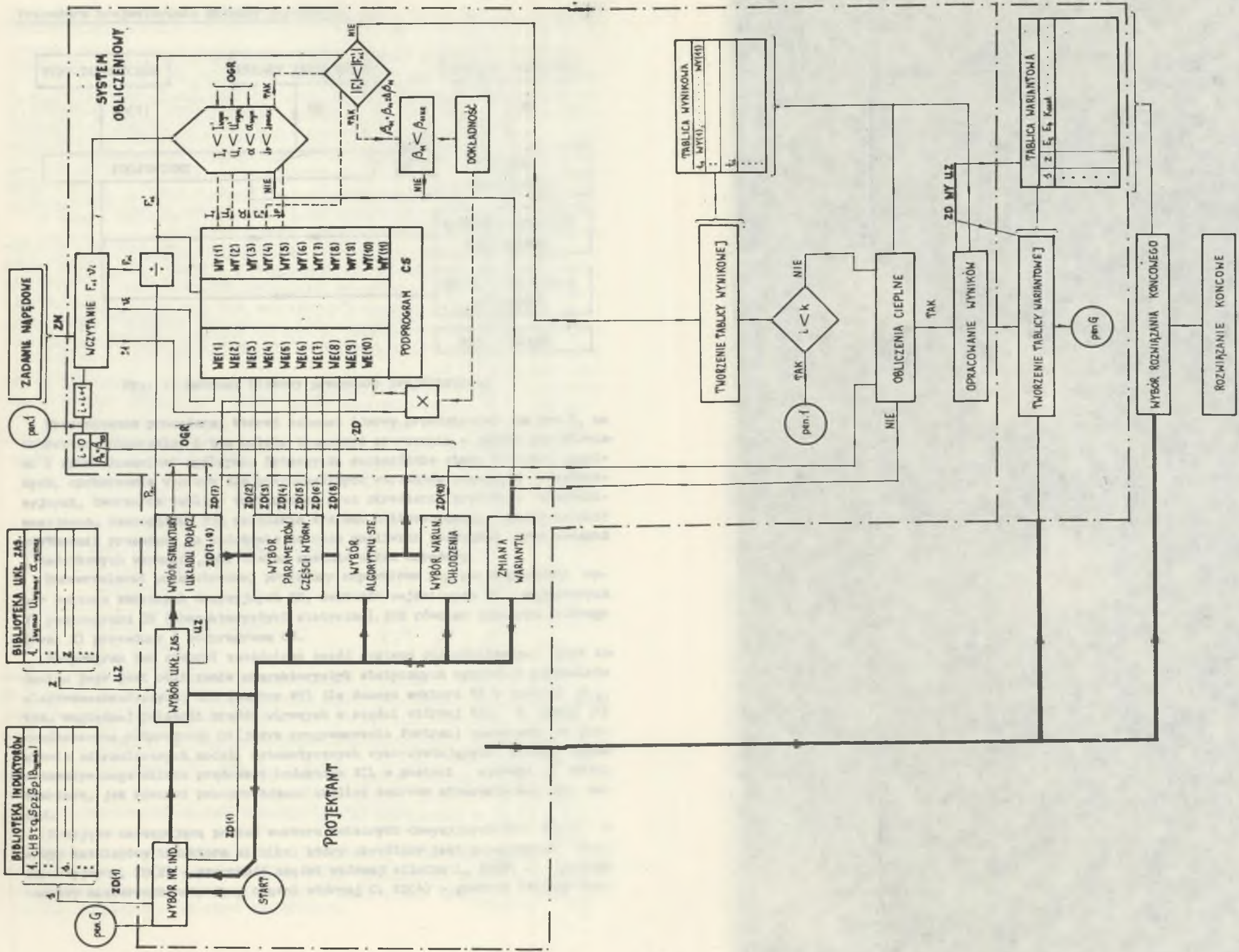
Złożoność ta wynika również z możliwości zwielokrotnienia mocy poprzez szeregowo lub równoległe łączenie kilku induktorów w jeden system napędowy, szerokiego zakresu zmian parametrów induktorów oraz wielkości rozwiązań konfiguracji mechanicznej układu (ruchomy induktor - nieruchoma bieźnia lub odwrotnie).

Dlatego też, konieczne staje się użycie w procesie projektowania układów elektromechanicznych zawierających sterowany częstotliwościowo SIL modeli matematycznych określonych parametrami elektryczno-konstrukcyjnymi, które umożliwiają obliczenie charakterystyk statycznych jak również rozbudowanych procedur obliczeniowych wykorzystujących maszyny cyfrowe.

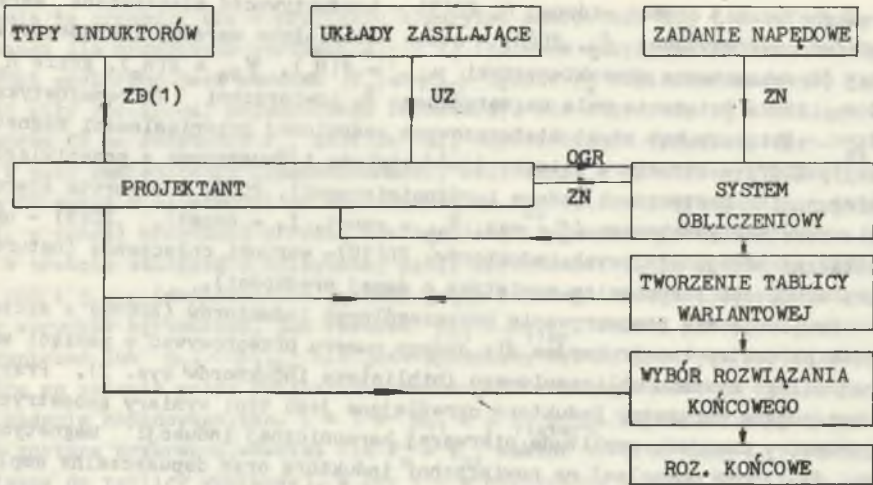
2. OPIS PROCEDURY PROJEKTOWANIA

Procedurę projektowania (pierwszy etap) przedstawiono w postaci schematu blokowego na rys. 1. Projektant dokonując wyboru typu induktora (zmienna decyzja ZD(1)), układu zasilającego (wektor UZ) oraz wektora zmiennych decyzyjnych ZD i ograniczeń OGR tworzy za pomocą systemu obliczeniowego, dla danego zadania napędowego ZN, tablicę rozwiązań wariantowych. Każdy wiersz tej tablicy zawiera wartości wybranych przez projektanta parametrów, odnoszących się do poszczególnych wariantów rozwiązań układu napędowego (typ induktora, układ zasilający, całkowita energia czynna i bierna, maksymalna wartość siły normalnej F_y , maksymalne przyrosty temperatury itp.). Wyboru rozwiązania końcowego dokonuje się z tablicy wariantowej na podstawie przyjętego kryterium optymalizacyjnego.

Przyjęcie metody wyboru rozwiązania optymalnego poprzez tworzenie tablicy wariantowej wynika z opisanej w uwagach wstępnych artykułu złożoności projektowania układów napędowych zawierających SIL. Zastosowanie jednej z metod optymalizacyjnych [2] prowadziłoby, dla wymaganej długości wektora ZD, do zbyt dużej rozbudowy systemu obliczeniowego.



Rys. 2. Schemat ideowy procedury projektowania układów napędowych zawierających SIL



Rys. 1. Schemat blokowy procedury projektowania

Prezentowana procedura, której schemat ideowy przedstawiono na rys.2, ma charakter uniwersalny i tym należy tłumaczyć operowanie w opisie określeniami i sformułowaniami ogólnymi. Dotyczy to szczególnie etapu obliczeń cieplnych, opracowania wyników dla poszczególnych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych, tworzenia tablicy wariantowej oraz określenia kryterium optymalizacyjnego. Szczegółowy tok działania systemu obliczeniowego winien ustalić użytkownik procedury na podstawie zakresu możliwych rozwiązań oraz wymagań i dodatkowych warunków, jaki winien spełnić układ napędowy.

Uniwersalność prezentowanej procedury zapewniono poprzez odpowiedni wybór wektora zmiennych decyzyjnych ZD, wektorów wejściowych WE i wyjściowych WY podprogramu CS (charakterystyki statyczne), jak również schematu ideowego (rys. 2) procedury i podprogramu CS.

Podprogram ten stanowi zasadniczą część systemu obliczeniowego, gdyż zadaniem jego jest obliczenie charakterystyk statycznych wybranych parametrów elektromechanicznych SIL (wektor WY) dla danego wektora WE w funkcji β_{11} , tzn. względnej pulsacji prądów wirowych w części wtórnej SIL. W pracy [1] zamieszczono podprogramy CS (język programowania Fortran) opracowane na podstawie sformułowanych modeli matematycznych wykorzystujących metodę opisu matematycznego okładu prądowego induktora SIL w postaci szeregu i całki Fouriera, jak również przeprowadzono analizę zakresu stosowalności obu metod.

Przyjęto następującą postać wektora zmiennych decyzyjnych ZD : ZD(1) - typ katalogowy induktora silnika, który określony jest parametrami konstrukcyjnymi, ZD(2) - szerokość części wtórnej silnika L, ZD(3) - grubość warstwy nieferromagnetycznej części wtórnej C, ZD(4) - grubość warstwy fer-

romagnetycznej części wtórnej D, ZD(5) - konduktywność elektryczna warstwy nieferromagnetycznej β_2 , ZD(6) - stałe materiałowe warstwy ferromagnetycznej (aproxymowane charakterystyki $\mu_{rFe} = f(H_m)$, $\psi_{Fe} = f(H_m)$, gdzie H_m - amplituda natężenia pola magnetycznego na powierzchni ferromagnetyka, a ψ_{Fe} - zastępczy kąt strat histerezowych zespolonej przenikalności magnetycznej), ZD(7) - struktura silnika (jednostronna i dwustronna z przeciwległymi biegunami magnetycznymi jedno- i różnoimiennymi), ZD(8) - algorytm sterowania częstotliwościowego ($\varphi = \max$, $B_{1y} = \text{const}$, $I_1 = \text{const}$), ZD(9) - układ połączeń uzwojeń fazowych induktorów, ZD(10) - warunki chłodzenia (naturalne lub wymuszone strumieniem powietrza o danej prędkości).

Proponuje się ponumerowanie poszczególnych induktorów (ZD(1)) a szczególne parametry konstrukcyjne dla danego numeru przechowywać w pamięci wspólnej całego systemu obliczeniowego (biblioteka induktorów rys. 2). Przyjęto następujące parametry induktora określające jego typ: wymiary geometryczne, parametry uzwojeń, amplituda pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej B_{1y} (składowa normalna) na powierzchni induktora oraz dopuszczalna amplituda prądu fazowego I_1 .

Parametry układów zasilających przedstawiono w postaci następującego wektora UZ: UZ(1) - maksymalny prąd fazowy, UZ(2) - maksymalne napięcie fazowe, UZ(3) - maksymalna względna częstotliwość prądu wyjściowego α .

Zadanie napędowe ZN, jakie powinien realizować układ napędowy, tzn. zależność siły pociągowej F_x i prędkości posuwu $\dot{\psi}$ w funkcji czasu można przedstawić w postaci tablicy (1).

$$ZN = \begin{bmatrix} t_1 & F_{x1} & \dot{\psi}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_1 & F_{x1} & \dot{\psi}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_k & F_{xk} & \dot{\psi}_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

W bloku: wybór struktury i układu połączeń (rys. 2) projektant na podstawie przyjętej struktury ZD(7) i układu połączeń ZD(9) oraz parametrów UZ wybranego układu zasilającego określa wektor ograniczeń OGR odnoszących się do pojedynczego induktora układu napędowego. Współczynnik P_{Fx} równy jest ilości induktorów.

System obliczeniowy działając wzdłuż pętli PEN1 oblicza dla danego wariantu ZD i UZ wartość tablicy wynikowej, tzn. dla każdego t_1 wpisuje wektor wynikowy WY podprogramu CS oraz sprawdza spełnienie warunków ograniczeń.

Obliczenia wektora WY prowadzi się wzdłuż pętli zaznaczonej na rys. 2 przerywaną linią powiększając β_{11} o przyrost $\pm \Delta \beta_{11}$ od wartości startowej $\beta_{11} = \beta_{11start}$ przy czym o znaku $\pm \Delta \beta_{11}$ decyduje znak F_{x1} względem $\dot{\psi}_1$. Obli-

czenia te prowadzi się w przypadku algorytmu sterowania $B_{1y} = \text{const}$ i $I_1 = \text{const}$ dla przyjętych wartości B_{1y} i I_1 (zmienna decyzyjna ZD(1)) dopóty, dopóki spełniony jest warunek $|F_x| < |F_{xi}|$ (gdzie F_x obliczona przez CS wartość siły pociągowej pojedynczego induktora). Dla algorytmu $\eta = \max$ podprogram CS na podstawie F_{xi} oblicza β_{11} odpowiadająca warunkowi $\eta = \max$.

W celu zmniejszenia czasochłonności, obliczenia w opracowanym podprogramie CS można w zależności od stosunku F_x do F_{xi} (dla algorytmu $B_{1y} = \text{const}$ i $I_1 = \text{const}$) prowadzić z różną dokładnością i ograniczoną długością wektora WY.

W trakcie obliczeń w opisywanej pętli sprawdzane są, na podstawie wektora OGR i j_{pmax} (dopuszczalna gęstość prądu fazowego uzwojenia), spełnienia się warunków ograniczeń, jak również $\beta_{11} < \beta_{11kr}$. Jeżeli któryś z warunków ograniczeń lub $\beta_{11} < \beta_{11kr}$ nie jest spełniony system przerywa obliczenia, które po zmianie przez projektanta wektora ZD zostaną wznowione od początku zadania napędowego, tzn. $i = 1$ a $\beta_{11} = \beta_{11start}$. Gdy obliczenia w pętli nie zostaną przerwane, wówczas dla $F_x = F_{xi}$ wektor WY oraz czas t_1 zostanie wpisany do tablicy wynikowej, a gdy $i < k$ obliczenia w pętli PEN1 będą kontynuowane.

Wektor zmiennych wejściowych podprogramu CS przyjęto następującej postaci:

- WE(1) - prędkość posuwu v ,
- WE(2) \div WE(9) = ZD(1) \div ZD(8),
- WE(10) - stała określająca dokładność obliczeń, znak $\pm \Delta \beta_{11}$ oraz długość wektora WY.

Natomiast wektor zmiennych wyjściowych WY podprogramu CS:

- WY(1) - amplituda prądu fazowego induktora I_1 ,
- WY(2) - napięcie fazowe U_1 ,
- WY(3) - względna częstotliwość prądu α ,
- WY(4) - siła pociągowa F_x ,
- WY(5) - gęstość prądu fazowego j_p ,
- WY(6) - siła normalna F_y ,
- WY(7) - straty mocy ΔP_{cu} ,
- WY(8) - straty mocy ΔP_s ,
- WY(9) - pulsacja względna prądów wirowych części wtórnej β_{11} ,
- WY(10) - kąt fazowy φ ,
- WY(11) - położenie na charakterystyce mechanicznej, tzn. określenie zasady sterowania ($\eta = \max$, $B_{1y} = \text{const}$, $I_1 = \text{const}$) dla danego β_{11} .

Gdy $i = k$, tzn. po zakończeniu obliczeń dla danego wariantu wektora ZD, system obliczeniowy na podstawie tablicy wynikowej i ZD(1) przeprowadza obliczenia cieplne, tzn. sprawdza spełnienie warunków ograniczenia maksymalnych przyrostów temperatury. Jest to jeden z istotniejszych etapów projektowania, gdyż produkowane induktory charakteryzują się niską, znamionową wartością względnego czasu pracy. W etapie tym stosować można metodę przyrostów temperatury lub strat zastępczych.

W publikacji [3] zamieszczono wiele interesujących informacji i wyników badań stanów termicznych SIL z zastosowaniem chłodzenia naturalnego lub wymuszonego strumieniem powietrza, na podstawie których można dokonać wyboru warunków chłodzenia SIL (ZD(10)).

Po przeprowadzeniu obliczeń cieplnych system obliczeniowy opracowuje dla danego wariantu ZD wartości stanowiące wiersz tablicy wariantowej. Obliczenia na tym etapie uzależnione są od przyjętego kryterium optymalizacyjnego i dodatkowych wymagań zadania napędowego (np. ograniczenia temperatury części wtórnej). Obliczenia te polegają na wyznaczeniu całkowitej dla danego ZN energii elektrycznej czynnej i biernej (na podstawie odpowiednich elementów WY i UZ), wielkości nakładów inwestycyjnych, maksymalnych przyrostów temperatury uzwojeń induktora i bieżni, maksymalnej wartości siły normalnej F_y itp.

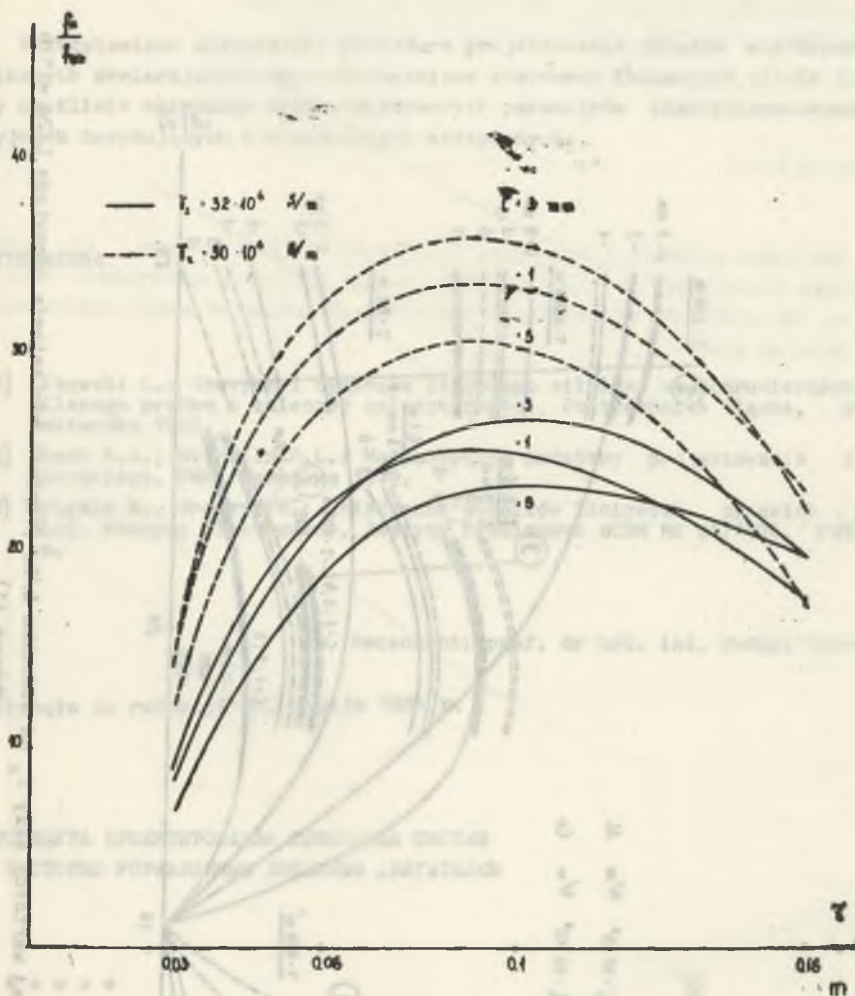
Ostatnim etapem przedstawionej procedury projektowania (pierwszy etap) jest wybór rozwiązania końcowego. Wybór ten w przypadku układów napędowych zawierających indukcyjny silnik linowy wymaga, ze względu na opisaną we wstępie złożoność, uwzględnienia wielu czynników. Dlatego też, zastosowano metodę projektowania poprzez tworzenie tablicy wariantowej.

Na podstawie wyników obliczeń stanowiących tablicę wariantową można wyznaczyć wartość funkcji celu sformułowanej na podstawie wymagań stawianych przez użytkownika układu napędowego i przyjętego kryterium.

Zdecydowane usprawnienie toku projektowania, tzn. tworzenia poszczególnych wariantów konstrukcyjnych, można uzyskać poprzez wykorzystanie wyników analizy własności statycznych SIL przeprowadzonej w pracy [1]. Wyniki te prezentują zależność podstawowych parametrów elektromechanicznych SIL od wybranych zmiennych stanowiących wektor ZD. Umożliwiają więc, przyjęcie odpowiedniej strategii zmian wartości zmiennych ZD w trakcie tworzenia tablicy wariantowej stanowiącej podstawę wyboru rozwiązania końcowego.

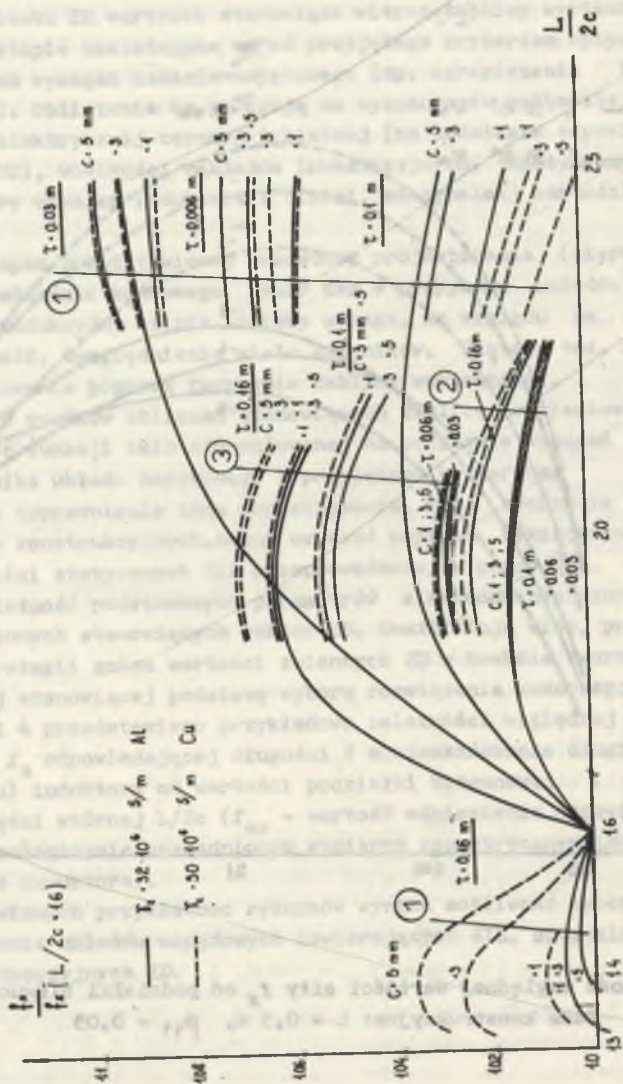
Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowo zależności względnej wartości siły pociągowej f_x odpowiadającej długości 1 m nieskończenie długiego (wzdłuż kierunku ruchu) induktora od wartości podziałki biegunowej $\tilde{\epsilon}$ i względnej szerokości części wtórnej $L/2c$ (f_{ox} - wartość odniesienia odpowiadająca minimalnym, technologicznie uzasadnionym wymiarom geometrycznym induktora [1], $2c$ - szerokość induktora).

Z przedstawionych przykładowo rysunków wynika możliwość wyboru, w procesie projektowania układów napędowych zawierających SIL, optymalnych wartości zmiennych decyzyjnych ZD.



Rys. 3. Zależność względnej wartości siły f_x od podziałki biegunowej τ .

Dane konstrukcyjne: $L = 0,5 \text{ m}$, $\beta_{11} = 0,05$



Rys. 4. Zależność względnej wartości siły f_x od stosunku $L/2c$ (wartość odniesienia odpowiada $L/2c = 1.6$)
 Wykres A1)

Dane konstrukcyjne: $B'' = 0,002 \text{ m}$, $D = 0,007 \text{ m}$, $\mu_{rFe} = 100$, ① - $2c = \tau$; ② - $2c = 2\tau$; ③ - $2c = 5\tau$.

3. PODSUMOWANIE

Представлена универсальная процедура проектирования электромеханических систем, содержащих частотно-регулируемый индукционный двигатель линейного типа, позволяющая оптимально выбрать основные параметры электрических и конструктивных решений, влияющих на статические свойства системы.

LITERATURA

- [1] Lisowski L.: Statyka i dynamika liniowego silnika asynchronicznego zasilanego prądem o zmiennej częstotliwości. Politechnika Śląska, praca doktorska 1983.
- [2] Stark R.S., Nicholls R.L.: Matematyczne podstawy projektowania inżynierskiego. PWN, Warszawa 1979.
- [3] Mrugała B., Graczyk M.: Chłodzenie silników liniowych płaskich typu SL-5. Maszyny elektryczne, Zeszyty Problenowe BOBR ME 24/1976, Katowice.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Janusz Turowski

Wpłynęło do redakcji dn. 9 maja 1984 r.

ПРОЦЕДУРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ
С ЧАСТОТНО УПРАВЛЯЕМЫМ ЛИНЕЙНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Р е з ю м е

В работе представлена процедура первого этапа проектирования приводных систем с частотно управляемым, индукционным, линейным двигателем. Этот этап дает возможность выбора основных параметров определяющих статические свойства системы.

