

MASZYNY ELEKTRYCZNE WOKÓŁ NAS

Zastosowanie, budowa, modelowanie, charakterystyki, projektowanie

Mieczysław Ronkowski

Michał Michna

Grzegorz Kostro

Filip Kutt

Pod redakcją Mieczysława Ronkowskiego

Politechnika Gdańska

Wydział Elektrotechniki i Automatyki

2009/10



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



MASZYNY ELEKTRYCZNE WOKÓŁ NAS

Zastosowanie, budowa, modelowanie, charakterystyki, projektowanie

Mieczysław Ronkowski

Michał Michna

Grzegorz Kostro

Filip Kutt

Pod redakcją Mieczysława Ronkowskiego

E-skrypt

Kierunek Elektrotechnika

*Studia stacjonarne 1-szego stopnia
semestr 3*

Publikacja jest dystrybuowana bezpłatnie

Materiały zostały przygotowane w związku z realizacją projektu pt. „Zamawianie kształcenia na kierunkach technicznych, matematycznych i przyrodniczych - pilotaż” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego nr umowy: 46/DSW/4.1.2/2008 zadanie 018240 w okresie od 21.08.2008-15.03.2012

9 Elementy projektowania maszyn elektrycznych. Przykłady obliczeń

9.1 Uwagi wstępne

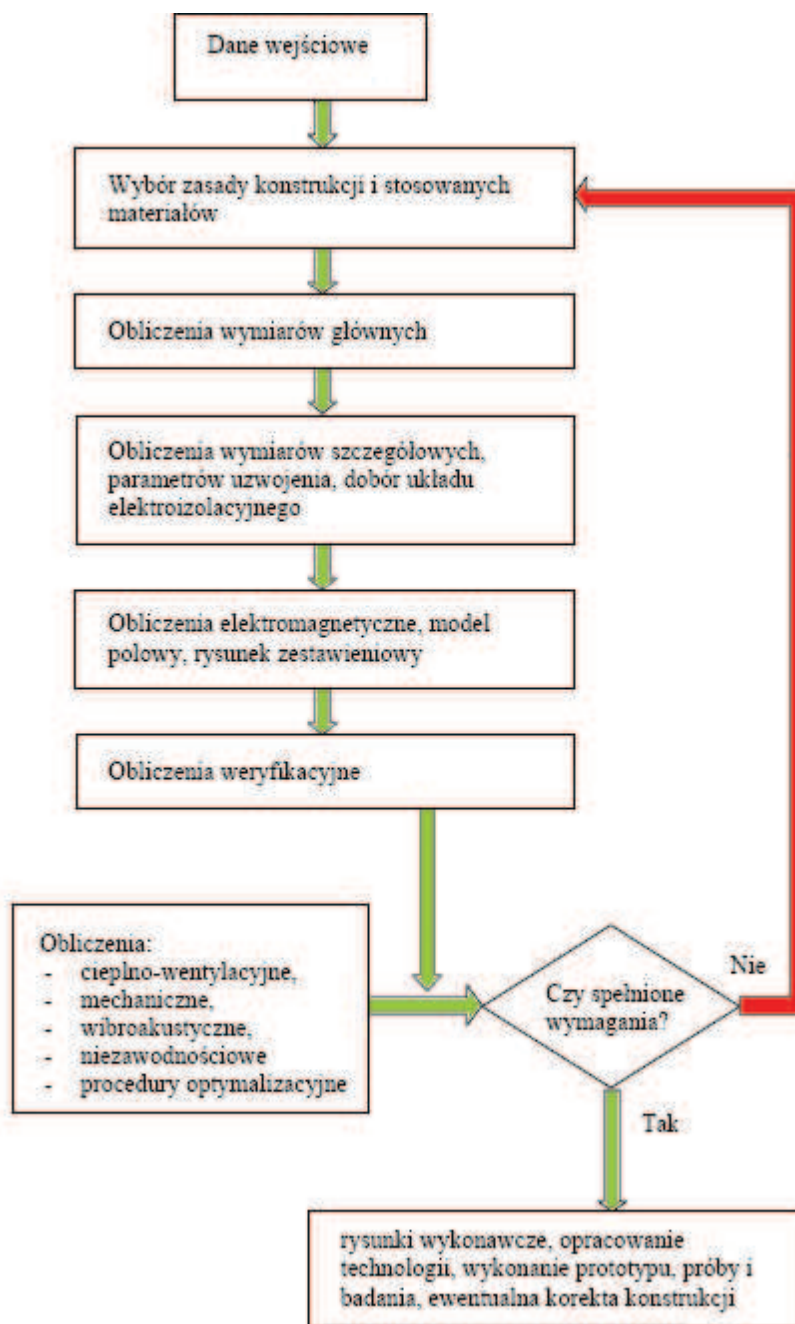
Projektowanie jest działaniem celowym, polegającym na uporządkowanym przygotowaniu zbioru informacji niezbędnych do budowy urządzenia lub realizacji procesu zaspokajającego określoną potrzebę. Procesy związane z rozwojem metod projektowania przyczyniły się do postępu technicznego, stały się również głównym elementem pośredniczącym między nauką i przemysłem.

Współczesne projektowanie polega na opracowywaniu nowych rozwiązań optymalnych pod względem przyjętych założeń z zastosowaniem odpowiednich metod i formuł matematycznych [1].

W procesie projektowania maszyn elektrycznych bardzo często napotykamy na różnego rodzaju problemy. Problemy te można podzielić na następujące rodzaje:

- Problem syntezy – jest podstawowym problem w dziedzinie projektowania. Jego rozwiązanie polega na odpowiednim doborze materiałów, wymiarów, wzajemnego rozmieszczenia i połączenia elementów maszyny przy uwzględnieniu przyjętych założeń i spełnieniu postawionych wymagań dotyczących właściwości funkcjonalnych oraz warunków wzajemnego oddziaływania maszyny i środowiska. Problem syntezy nie ma jednoznacznego rozwiązania, dlatego też przy jego opracowaniu mogą być uwzględnione wymagania dodatkowe: optymalizacyjne, jak również wynikające z ograniczeń niektórych wielkości np. wymiarów gabarytowych, czy ergonomicznych -dotyczących np. łatwości obsługi.
- Problem analizy – jego rozwiązanie związane jest z wyznaczeniem niektórych parametrów funkcjonalnych maszyny, a czasami również warunków środowiskowych, bazując na wszystkich znanych wymiarach oraz uwzględniając pozostałe parametry funkcjonalne wymagania środowiskowe. Problemem analizy występuje w przypadku, gdy sprawdzamy możliwość zastosowania zaprojektowanej już maszyny bez dokonywania zmian konstrukcyjnych do: innych warunków zasilania, innego rodzaju obciążenia lub do innych warunków klimatycznych niż te, na które została ona zaprojektowana.
- Problem kompleksowy – jest sumą dwóch przytoczonych powyżej zagadnień: zagadnienia analizy i syntezy. Jego rozwiązanie polega na doborze niektórych materiałów i niektórych wymiarów oraz wprowadzeniu zmian w rozmieszczeniu i połączeniach elementów maszyny, a także na określeniu niektórych nowych parametrów funkcjonalnych na podstawie zadanych wymiarów części jej elementów, zadanych pozostałych wymagań funkcjonalnych oraz warunków wzajemnego oddziaływania maszyny i środowiska. Problem ten występuje np. przy wykorzystaniu w projekcie nowej maszyny elementów maszyn już zaprojektowanych.

Na rys. 9.1 przedstawiono ogólny algorytm projektowania maszyn elektrycznych. Pokazano tu drogę, jaką musi przebyć każdy projektant maszyny, aby osiągnąć zamierzony efekt końcowy, tzn. zaprojektować maszynę elektryczną odpowiadającą określonym wymaganiom i założeniom projektowym.



Rys. 9.1 Ogólny algorytm postępowania w procesie projektowania maszyn elektrycznych (źródło [2]).

Jako przykład projektowania maszyn elektrycznych przedstawiono obliczenia:

- silnika indukcyjnego/asynchronicznego klatkowego;
- silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi.

9.2 Projekt silnika indukcyjnego klatkowego

Pierwszy generator prądu przemiennego został zbudowany w 1884 roku [1]. Maszyny prądu przemiennego, uznane za przydatne dopiero po około trzydziestu latach od ich wynalezienia, zajmują znaczącą pozycję we współczesnej cywilizacji. Największą grupą produkowanych maszyn

elektrycznych na świecie są silniki indukcyjne, które stanowią niemal 80% ogółu produkcji, wśród nich prym wiodą silniki indukcyjne klatkowe, które stanowią 74% światowej produkcji, tylko 6% stanowią silniki indukcyjne pierścieniowe, pozostałe 20% stanowią inne maszyny elektryczne [2].

Silniki indukcyjne klatkowe stanowią najliczniejszą grupę produkowanych obecnie silników elektrycznych na świecie. Zaletą tego typu silników jest ich stosunkowo niska cena (w porównaniu z innymi silnikami), prosta obsługa oraz to, że pracują przy zasilaniu z powszechnie dostępnej sieci prądu przemiennego [3, 5, 6, 8].

Rozwój energoelektroniki umożliwił zastosowanie silników asynchronicznych klatkowych do napędów wymagających zmiennej prędkości obrotowej. Ponadto zastosowanie falownika z odpowiednim algorytmem sterowania do zasilania silnika indukcyjnego klatkowego pozwala na kształtowanie jego charakterystyki mechanicznej i odpowiednie dopasowanie jej do potrzeb układu napędzanego.

Podstawą projektowania silnika indukcyjnego klatkowego jest algorytm postępowanie przedstawiony na rys. 9.1, który opracowano na podstawie książki prof. Mirosława Dąbrowskiego [1] i materiałów dydaktycznych dr inż. Krzysztofa Bieńkowskiego [2].

9.2.1 Dobór wymiarów głównych i szczegółowych silnika

Dane wejściowe (tabela 9.1) stanowią podstawę procesu obliczania wymiarów głównych i szczegółowych silnika (tabela 9.2). Obliczenia silnika asynchronicznego klatkowego wykonano w jednym kroku.

Ze względu na to, że we wzorach, które wykorzystywane są do wyznaczania wymiarów głównych maszyny jest więcej niewiadomych niż wynika to z danych wejściowych część wartości należy dobrać z tabel lub wykresów (sporządzonych na podstawie wieloletnich doświadczeń projektowych) dostępnych w literaturze przedmiotu [1,2,4,7]. Podstawą doboru brakujących wielkości jest moc i liczba par biegunów.

Tabela 9.1 Parametry wejściowe

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Moc znamionowa	P_n	kW	2,2
Napięcie fazowe	U_{1n}	V	220
Częstotliwość	f_n	Hz	50
Liczba faz	m_s	-	3
Prędkość synchroniczna	n_s	1/min	1500
Liczba par biegunów	p	-	2
Uzwojenie stojana			jednowarstwowe

Tabela 9.2 Algorytm obliczeń silnika asynchronicznego

Lp.	Opis	Obliczenia	Wynik
Wymiary główne maszyny			
1.	Współczynnik napięcia indukowanego rotacji	$k_E = 0,985 - 0,005 \cdot p$	$k_E = 0,975$
2.	Napięcie indukowane rotacji	$E = k_E U_{1n} = 0,975 \cdot 220$	$E = 213,9 \text{ V}$

3.	Sprawność maszyny		$\eta_n = 0,8$ ⁴⁵
4.	Moc elektryczna maszyny	$P_{el} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{2,2 \cdot 10^3}{0,8}$	$P_{el} = 2,75 \text{ kW}$
5.	Współczynnik mocy		$\cos \phi_n = 0,8$ ⁴⁶
6.	Prąd znamionowy maszyny	$I_{1n} = \frac{P_{el}}{m_s \cdot U_{1n} \cdot \cos \phi_n} = \frac{2,75 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,8}$	$I_{1n} = 5,22 \text{ A}$
7.	Moc pozorna wewnętrzną maszyny	$S_i = m_s \cdot E \cdot I_{1n} = 3 \cdot 213,9 \cdot 5,22$	$S_i = 3,35 \text{ kW}$
Liczba żłobków stojana			
8.	Liczba żłobków na biegun i fazę		$q = 3$ ⁴⁷
9.	Liczba żłobków stojana	$Q_s = 2 \cdot q \cdot p \cdot m_s = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3$	$Q_s = 36$
Współczynnik uzwojenia stojana			
10.	Kąt elektryczny między sąsiednimi wektorami napięć żłobkowych	$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{Q_s} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2}{36}$	$\alpha = 0,349$
11.	Współczynnik grupy	$k_g = \frac{\sin(\frac{q \cdot \alpha}{2})}{q \cdot \sin(\frac{\alpha}{2})} = \frac{\sin(\frac{3 \cdot 0,349}{2})}{3 \cdot \sin(\frac{0,349}{2})}$	$k_g = 0,96$
12.	Poskok średnicowy uzwojenia	$y_1 = \frac{Q_s}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 \cdot 2}$	$y_1 = 9$
13.	Podziałka biegunowa liczona w żłobkach	$\tau_p = \frac{Q_s}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 \cdot 2}$	$\tau_p = 9$
14.	Współczynnik skrótu	$k_s = \sin(\frac{y_1 \cdot \pi}{\tau_p}) = \sin(\frac{9}{9} \cdot \frac{\pi}{2})$	$k_s = 1$
15.	Współczynnik uzwojenia	$k_u = k_g \cdot k_s = 0,96 \cdot 1$	$k_u = 0,96$
16.	Okład prądowy		$A_p = 25 \cdot 10^3 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ ⁴⁸
17.	Indukcja w szczeliny powietrznej		$B_p = 0,85 \text{ T}$ ⁴⁹

⁴⁵ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.212, (WNT).

⁴⁶ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.213, (WNT).

⁴⁷ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.238, (WNT).

⁴⁸ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.226, (WNT).

⁴⁹ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.226, (WNT).

18.	Współczynnik wykorzystania podziałki biegunowej		$\alpha_i = 0,715$
19.	Współczynnik smukłości silnika		$\lambda = 1,350$
20.	Objętość obliczeniowa maszyny	$Y = \frac{S_i \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{\pi^3 \cdot A_p \cdot B_p \cdot \alpha_i \cdot n_s \cdot k_u} =$ $= \frac{3352 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{\pi^3 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,715 \cdot 25 \cdot 0,96}$	$y = 8,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
21.	Średnica obliczeniowa maszyny	$D = \left(\frac{Y \cdot 2 \cdot p}{\lambda \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{8,38 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 2}{1,3 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$	$D = 0,114 \text{ m}$
22.	Podziałka biegunowa maszyny	$\tau_{pz} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,09365}{2 \cdot 2}$	$\tau_{pz} = 73,55 \text{ mm}$
23.	Długość obliczeniowa maszyny	$l_i = \lambda \cdot \tau_{pz} = 1,3 \cdot 0,07355$	$l_i = 95,62 \text{ mm}$
Projekt uzwojenia stojana			
24.	Liczba zwojów pasma fazowego	$z = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot B_p \cdot f_n \cdot \tau_{pz} \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot k_u} =$ $= \frac{\sqrt{2} \cdot 213,9}{2 \cdot \pi \cdot 0,85 \cdot 50 \cdot 0,0735 \cdot 0,0956 \cdot 0,715 \cdot 0,96}$	$z = 234,7$
25.	Liczba zwojów pasma fazowego		$z = 234^{51}$
26.	Liczba zwojów pojedynczej cewki	$N_{cl} = \frac{z \cdot m_s}{Q_s} = \frac{234 \cdot 3}{36}$	$N_{cl} = 39$
27.	Całkowita liczba przewodów	$N = 2 \cdot z \cdot m_s = 2 \cdot 234 \cdot 3$	$N = 1404$
28.	Liczba przewodów w żłobku	$N_s = \frac{2 \cdot m_s \cdot z}{Q_s} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 234}{36}$	$N_s = 39$
29.	Skorygowana wartość okładu prądowego	$A_p = \frac{I_{1n} \cdot 2 \cdot z \cdot m_s}{\pi \cdot D} = \frac{5,22 \cdot 2 \cdot 234 \cdot 3}{\pi \cdot 0,09365}$	$A_p = 2,492 \cdot 10^3 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
30.	Skorygowana wartość indukcji w szczelinie powietrznej	$B_p = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot \tau_{pz} \cdot l_i \cdot \alpha_i \cdot k_u \cdot f_n} =$ $= \frac{\sqrt{2} \cdot 213,9}{2 \cdot \pi \cdot 234 \cdot 0,0735 \cdot 0,09562 \cdot 0,715 \cdot 0,96 \cdot 50}$	$B_p = 0,853 \text{ T}$

⁵⁰ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.217, (WNT).

⁵¹ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

Dobór przewodu nawojowego		
31.	Gęstość prądu w uzwojeniach stojana	$j = 6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ ⁵²
32.	Przekrój przewodu	$S_{Cu} = \frac{I_{1n}}{j} = \frac{5,22}{6}$ $S_{Cu} = 0,87 \text{ mm}^2$
33.	Średnica przewodu	$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8,7 \cdot 10^{-7}}{\pi}}$ $d = 1,05 \text{ mm}$
34.	Przyjęta średnica przewodu	$d = 1 \text{ mm}$ ⁵³
35.	Przekrój przewodu	$S_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1 \cdot 10^{-6})^2}{4}$ $S_d = 0,78 \text{ mm}^2$
36.	Przekrój wszystkich przewodów w żłobku stojana	$S_{Cu\dot{z}} = N_s \cdot S_d = 39 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7}$ $S_{Cu\dot{z}} = 30,63 \text{ mm}^2$
Wymiary żłobka stojana		
37.	Współczynnik wypełnienia żłobka	$k_z = 0,5$ ⁵⁴
38.	Przekrój żłobka stojana	$S_{z1} = \frac{S_{Cu\dot{z}}}{k_z} = \frac{30,63 \cdot 10^{-6}}{0,5}$ $S_{z1} = 61,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
39.	Podziałka żłobkowa stojana	$\tau_s = \frac{\pi \cdot D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,09365}{36}$ $\tau_s = 8,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
40.	Indukcja w zębie stojana	$B_{z1} = 1,4T$ ⁵⁵
41.	Szerokość zęba stojana	$b_{z1} = \frac{B_p}{B_{z1}} \cdot \tau_s = \frac{0,853}{1,4} \cdot 8,17 \cdot 10^{-3}$ $b_{z1} = 4,98 \text{ mm}$
42.	Przyjęto szerokość zęba stojana	$b_{z1} = 5 \text{ mm}$ ⁵⁶
43.	Szerokość rozwarcia żłobka	$b_{s1} = d + 1 \text{ mm} = 1 + 1,2$ $b_{s1} = 2,2 \text{ mm}$
44.	Kąt zbieżności ścianek bocznych żłobka	$\beta_{qs} = \frac{2 \cdot \pi}{Q_s} = \frac{2 \cdot \pi}{36}$ $\beta_{qs} = 0,175$
45.	Grubość szczeliny powietrznej	$\delta = 0,00015 + 0,002 \cdot \sqrt{D \cdot l_i} =$ $= 0,00015 + 0,002 \cdot \sqrt{0,09365 \cdot 0,09562}$ $\delta = 0,339 \text{ mm}$

⁵² K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

⁵³ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

⁵⁴ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.205, (WNT).

⁵⁵ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

⁵⁶ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

46.	Znormalizowane wymiary szczeliny powietrznej przyjmuje się co 0,05mm		$\delta = 0,35 \text{ mm}$
47.	Średnica wewnętrzna stojana	$D_s = 2 \cdot \delta + D = 2 \cdot 0,00035 + 0,09365$	$D_s = 94,35 \text{ mm}$
48.	Wysokość rozwarcia żłobka stojana		$h_{s1} = 1 \text{ mm}$ ⁵⁷
49.	Promień dolnego (mniejszego) okręgu żłobka stojana	$R_{s1} = \frac{[(D_s + 2 \cdot h_{s1}) \cdot \sin(\frac{\beta_{qs}}{2}) - b_{z1}]}{2 \cdot [1 - \sin(\frac{\beta_{qs}}{2})]} =$ $= \frac{[(0,09435 + 2 \cdot 0,001) \cdot \sin(\frac{0,175}{2}) - 0,005]}{2 \cdot [1 - \sin(\frac{0,175}{2})]}$	$R_{s1} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
50.	Równanie opisujące zależność pomiędzy promieniami i wysokością żłobka stojana	$R_{s2} = R_{s1} + h_{s0} \cdot \frac{\sin(\frac{\beta_{qs}}{2})}{[1 + \sin(\frac{\beta_{qs}}{2})]}$	
51.	Równanie na pole przekroju żłobka stojana	$S_{z1} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot h + \frac{\pi}{2} [R_{s1}^2 + R_{s2}^2]$	
52.	Wysokość części trapezowej żłobka stojana		$h_{s0} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
53.	Promień górnego okręgu żłobka stojana	$R_{s2} = R_{s1} + h_{s0} \cdot \frac{\sin(\frac{\beta_{qs}}{2})}{[1 + \sin(\frac{\beta_{qs}}{2})]} =$ $1,9 \cdot 10^{-3} + 0,0095 \cdot \frac{\sin(\frac{0,175}{2})}{[1 + \sin(\frac{0,175}{2})]}$	$R_{s2} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
54.	Całkowita wysokość żłobka stojana	$h_{qs} = h_{s1} + R_{s1} + R_{s2} + h_{s0} =$ $= 1 \cdot 10^{-3} + 1,9 \cdot 10^{-3} + 2,8 \cdot 10^{-3} + 9,5 \cdot 10^{-3}$	$h_{qs} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

⁵⁷ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn.*

55.	Przekrój żłobka stojana	$S_{z1} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot h_{s0} + \frac{\pi}{2} \cdot (R_{s1}^2 + R_{s2}^2) =$ $= (1,9 \cdot 10^{-3} + 2,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} +$ $+ \frac{\pi}{2} \cdot [(1,9 \cdot 10^{-3})^2 + (2,8 \cdot 10^{-3})^2]$	$S_{z1} = 61,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
Indukcja w zębie i jarzmie stojana			
56.	Skorygowana wartość indukcji w zębie stojana	$B_{z1} = B_p \cdot \frac{\tau_s}{b_{z1}} = 0,853 \cdot \frac{8,17 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}}$	$B_{z1} = 1,39 \text{ T}$
57.	Indukcja w jarzmie	$B_{j1} = 2 \cdot B_p = 2 \cdot 0,853$	$B_{j1} = 1,7 \text{ T}$
58.	Strumień główny	$\phi_1 = B_p \cdot \tau_{pz} \cdot l_i \cdot \alpha_i = 0,853 \cdot 0,074 \cdot 0,175 \cdot 0,7$	$\phi_1 = 4,287 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$
59.	Wysokość jarzma stojana	$h_{j1} = \frac{\phi_1}{l_i \cdot 2 \cdot B_{j1}} = \frac{4,287 \cdot 10^{-3}}{0,09562 \cdot 2 \cdot 1,7}$	$h_{j1} = 13,19 \text{ mm}$
60.	Przyjęto skorygowaną wartość jarzma stojana:		$h_{j1} = 14 \text{ mm}$ ⁵⁸
61.	Skorygowana wartość indukcji w jarzmie stojana	$B_{j1} = \frac{\phi_1}{l_i \cdot 2 \cdot h_{j1}} = \frac{4,287 \cdot 10^{-3}}{0,175 \cdot 2 \cdot 0,014}$	$B_{j1} = 1,6 \text{ T}$
62.	Średnica zewnętrzna stojana	$D_e = D + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_{qs} + 2 \cdot h_{j1} =$ $= 0,09365 + 2 \cdot 35 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,01$	$D_e = 153 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Prąd w wirniku			
63.	Liczba żłobków wirnika		$Q_r = 28$ ⁵⁹
64.	Podziałka żłobkowa wirnika	$\tau_r = \frac{\pi \cdot D}{Q_r} = \frac{\pi \cdot 0,09365}{28}$	$\tau_r = 10,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
65.	Współczynnik długości pręta		$k_l = 0,9$ ⁶⁰
66.	Prąd w pręcie wirnika	$I_{pr} = I_{1n} \cdot k_l \cdot \left(\frac{m_s \cdot z \cdot k_u}{0,5 \cdot Q_r \cdot k_{ur}} \right) =$ $= 5,22 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{3 \cdot 234 \cdot 0,96}{0,5 \cdot 28 \cdot 1} \right)$	$I_{pr} = 226,22 \text{ A}$
67.	Prąd w pierścieniu zwierającym wirnika	$I_{pn} = \frac{0,5 \cdot I_{pr}}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Q_{r2}}\right)} = \frac{0,5 \cdot 226,22}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{28}\right)}$	$I_{pn} = 508,31 \text{ A}$

⁵⁸ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

⁵⁹ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.243, (WNT).

⁶⁰ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

68.	Gęstość prądu w pręcie wirnika		$j_{pr} = 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ ⁶¹
69.	Przekrój pręta klatki wirnika	$S_{pr} = \frac{I_{pr}}{j_{pr}} = \frac{226,22}{5}$	$S_{pr} = 45,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
70.	Gęstość prądu w pierścieniu zwierającym		$j_{pn} = 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ ⁶²
71.	Przekrój pierścienia zwierającego	$S_{pn} = \frac{I_{pn}}{j_{pn}} = \frac{508,31}{5}$	$S_{pn} = 101,66 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
Wymiary pierścienia zwierającego			
72.	Szerokość pierścienia zwierającego	$l_{pn} = \sqrt{0,5 \cdot S_{pn}} = \sqrt{101,66 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}$	$l_{pn} = 7,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
73.	Wysokość pierścienia zwierającego	$h_{pn} = 2 \cdot l_{pn} = 2 \cdot 7,13 \cdot 10^{-3}$	$h_{pn} = 17,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Wymiary żłobka w wirniku			
74.	Kąt zbieżności ścianek bocznych	$\beta_{qr} = \frac{2 \cdot \pi}{Q_r} = \frac{2 \cdot \pi}{28}$	$\beta_{qr} = 0,224$
75.	Szerokość rozwarcia żłobka wirnika		$h_{r1} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
76.	Wysokość rozwarcia żłobka wirnika		$b_{r1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
77.	Indukcja w zębie wirnika		$B_{z2} = 1,5 \text{ T}$
78.	Szerokość zęba wirnika	$b_{z2} = \frac{B_p}{B_{z2}} \cdot \tau_r$	$b_{z2} = 5,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
79.	Szerokość zęba wirnika		$b_{z2} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
80.	Promień górnego okręgu żłobka wirnika	$R_{r1} = \frac{(D - 2 \cdot h_{r1}) \cdot \sin\left(\frac{\beta_{qr}}{2}\right) - b_{z2}}{2 \cdot [1 + \sin\left(\frac{\beta_{qr}}{2}\right)]} =$ $= \frac{(0,09365 - 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot \sin\left(\frac{0,224}{2}\right) - 6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot [1 + \sin\left(\frac{0,224}{2}\right)]}$	$R_{r1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

⁶¹ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.228, (WNT).

⁶² M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.228, (WNT).

81.	Obliczono promień dolnego okręgu żłobka wirnika	$R_{r2} = \sqrt{\frac{R_{r1}^2 \cdot \left(\frac{Q_r}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - S_{pr}}{\frac{Q_r}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} =$ $= \sqrt{\frac{(2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \left(\frac{28}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 45,24 \cdot 10^{-6}}{\frac{28}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}$	$R_{r2} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
82.	Wysokość części trapezowej żłobka wirnika	$h_{r0} = \frac{R_{r1} - R_{r2}}{\sin\left(\frac{\beta_{qr}}{2}\right)} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} - 0,7 \cdot 10^{-3}}{\sin\left(\frac{0,224}{2}\right)}$	$h_{r0} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
83.	Całkowitą wysokość żłobka wirnika	$h_{qr} = h_{r0} + R_{r1} + R_{r2} + h_{r1} =$ $= 14 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 10^{-3}$	$h_{qr} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Wznios i średnice wału			
84.	Wznios osi wału, przyjęto wartość		$H = 100 \text{ mm}$ ⁶³
85.	Średnica wału pod rdzeń wirnika	$d_{ri} = 0,35 \cdot D_s = 0,35 \cdot 0,09365$	$d_{ri} = 0,033 \text{ m}$
86.	Przyjęto wartość znormalizowaną średnicy wału pod czop łożyskowy , która mieści się w przedziale	$d_2 = 0,7 \div 0,85 d_{ri}$	$d_2 = 30 \text{ mm}$ ⁶⁴
87.	Wartość znormalizowana średnicy wału pod czop końcowy	$d_3 = 0,9 \div 0,95 d_2$	$d_3 = 28 \text{ mm}$ ⁶⁵
88.	Wartość znormalizowana długości wału pod czop końcowy		$l_{czk} = 0,06 \text{ m}$ ⁶⁶
Współczynnik powiększenia szczeliny (Cartera)			

⁶³ M. Dąbrowski, *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Warszawa 1994, s.219, (WNT).

⁶⁴ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

⁶⁵ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

⁶⁶ K. Bieńkowski, *Materiały dydaktyczne do projektowania maszyn*.

89.	Współczynnik powiększenia szczeliny dla stojana	$k_{c1} = \frac{\tau_s + 10 \cdot \delta}{\tau_s + 10 \cdot \delta - b_{s1}} =$ $= \frac{8,17 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4}}{8,17 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4} - 2,2 \cdot 10^{-3}}$	$k_{c1} = 1,232$
90.	Współczynnik powiększenia szczeliny dla wirnika	$k_{c2} = \frac{\tau_r + 10 \cdot \delta}{\tau_r + 10 \cdot \delta - b_{r1}} =$ $= \frac{10,51 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4}}{10,51 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 35 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}}$	$k_{c2} = 1,167$
91.	Wypadkowy współczynnik Cartera	$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,232 \cdot 1,167$	$k_c = 1,437$

9.2.2 Wizualizacja wyników obliczeń silnika

Na podstawie przeprowadzonych w poprzednim rozdziale obliczeń wykonano rysunki poszczególnych elementów silnika asynchronicznego, takich jak żłobki stojana i wirnika, wał oraz zarysy przekrojów poprzecznych stojana i wirnika.

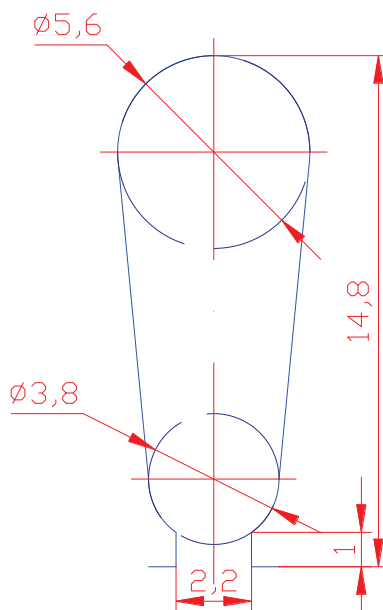
9.2.3 Wymiary żłobków stojana i wirnika

Tabela 9.3 zawiera wymiary żłobka i zęba stojana.

Tabela 9.3 Zestawienie wymiarów żłobka i zęba stojana

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Kąt zbieżności ścianek bocznych żłobka	β_{qs}		0,175
Wysokość otwarcia żłobka stojana	h_{s1}	m	$1 \cdot 10^{-3}$
Szerokość otwarcia żłobka	b_{s1}	m	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Promień dolnego (mniejszego) okręgu żłobka stojana	R_{s1}	m	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Promień górnego okręgu żłobka stojana	R_{s2}	m	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Wysokość części trapezowej żłobka	h_{s0}	m	$9,5 \cdot 10^{-3}$
Całkowita wysokość żłobka stojana	h_{qr}	m	$15 \cdot 10^{-3}$
Szerokość zęba stojana	b_{z1}	m	$5 \cdot 10^{-3}$

Na podstawie obliczonych wymiarów żłobka stojana (Tabela 9.3) wykonano rysunek zarysu żłobka stojana (rys. 9.2). Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



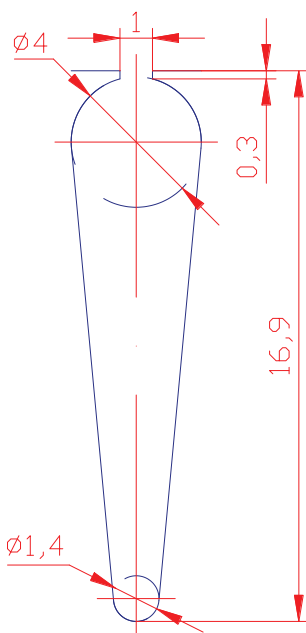
Rys. 9.2 Widok zarysu żłobka stojana

Tabela 9.4 zawiera wymiary żłobka i zęba wirnika.

Tabela 9.4 . Zestawienie wymiarów żłobka i zęba wirnika

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Kąt zbieżności ścianek bocznych	β_{qr}		0,224
Promień górnego okręgu żłobka	R_{r1}	m	$2 \cdot 10^{-3}$
Promień dolnego okręgu żłobka	R_{r2}	m	$0,7 \cdot 10^{-3}$
Szerokość zęba wirnika	b_{z2}	m	$6 \cdot 10^{-3}$
Szerokość otwarcia żłobka	b_{r1}	m	$2 \cdot 10^{-3}$
Wysokość części trapezowej żłobka	h_{r0}	m	$14 \cdot 10^{-3}$
Wysokość otwarcia żłobka	h_{r1}	m	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Całkowita wysokość żłobka wirnika	h_{qr}	m	$17,0 \cdot 10^{-3}$

Na podstawie obliczonych wymiarów żłobka wirnika (tabela 9.4) wykreślono zarys żłobka wirnika (rys. 9.3). Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



Rys. 9.3 Widok zarysu żłobka wirnika

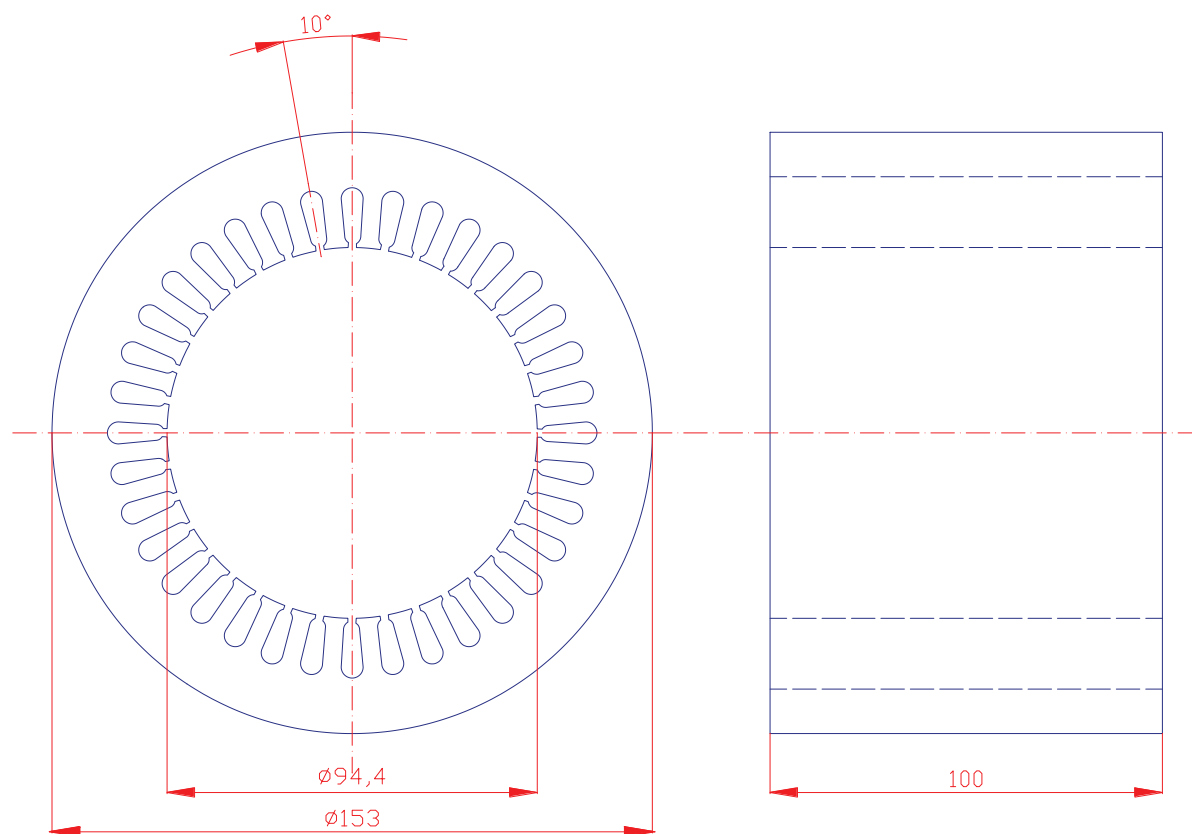
9.2.4 Wymiary główne maszyny

Tabela 9.5 zawiera wymiary główne maszyny.

Tabela 9.5 Zestawienie wymiarów głównych maszyny

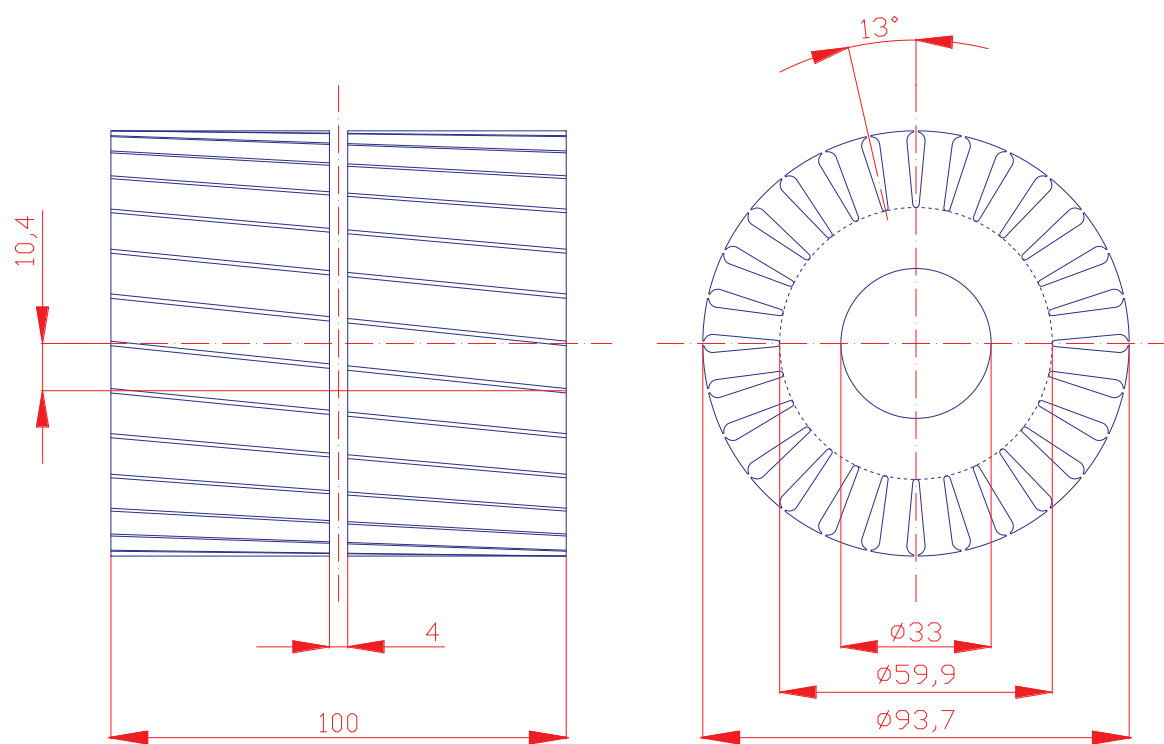
Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Całkowita długość obliczeniowa maszyny	l_i	m	0,09562
Szczelina powietrzna	δ	mm	0,35
Średnica wewnętrzna stojana	D_s	m	0,09435
Średnica zewnętrzna stojana	D_e	m	0,153
Średnica wału pod rdzeń wirnika	d_{ri}	m	0,0328
Liczba żłobków stojana	Q_s		36
Liczba żłobków wirnika	Q_r		28

Na rys. 9.4 pokazano zarys blachy stojana zaprojektowanej maszyny. Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



Rys. 9.4 Widok zarysu blachy stojana maszyny

Na rys. 9.5 przedstawiono zarys blachy wirnika. Wszystkie wymiary na rysunku podano w mm.



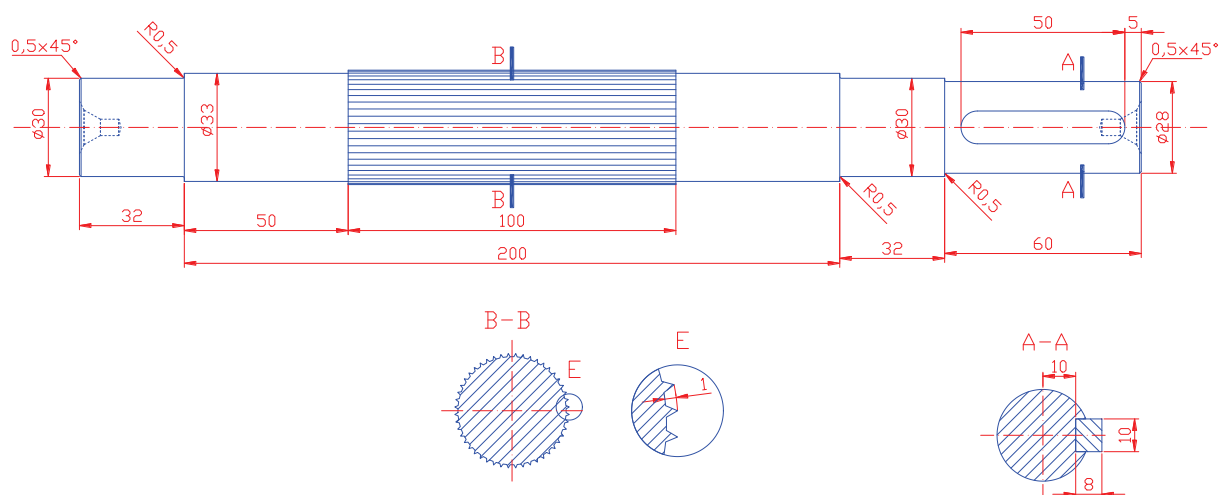
Rys. 9.5 Widok zarysu blachy wirnika maszyny

Tabela 9.6 zawiera wymiary wału maszyny.

Tabela 9.6 Zestawienie wymiarów wału maszyny

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
Średnica wału pod rdzeń wirnika	d_{ri}	mm	33
Średnica wału pod czop łożyskowy	d_2	mm	30
Średnica wału pod czop końcowy	d_3	mm	28
Wznios wału	H	mm	100
Długość wału pod czop końcowy	l_{czk}	mm	60
Całkowita długość wału maszyny	l	mm	304

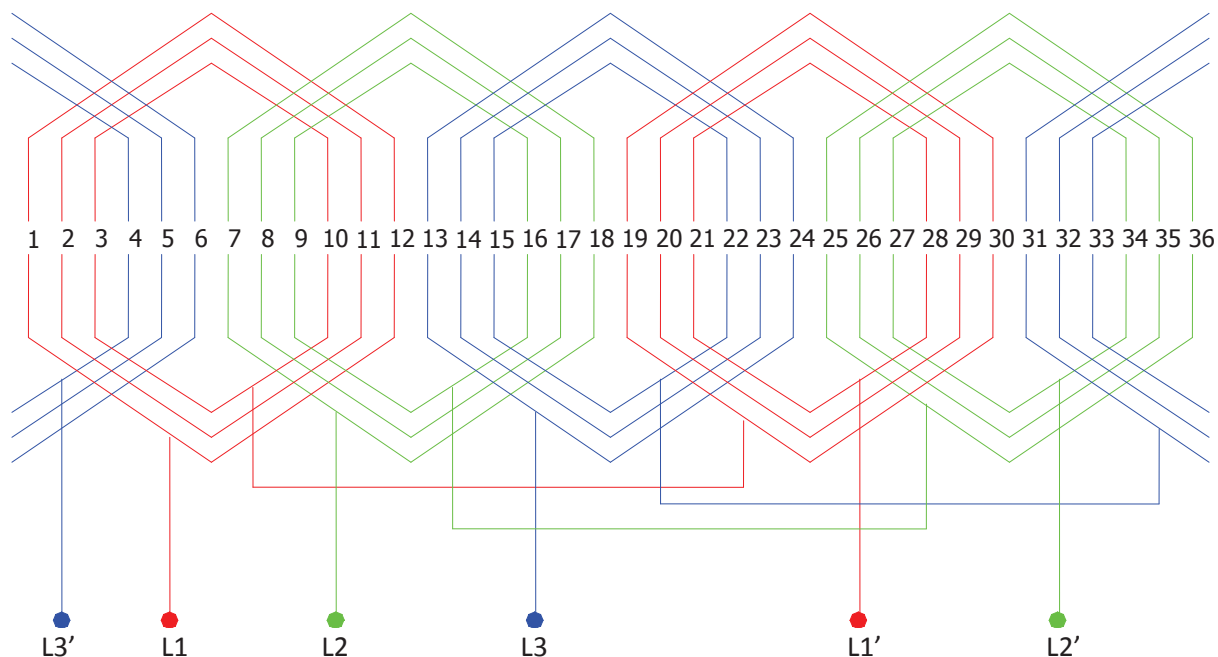
Na rys. 9.6 pokazano zarys przekroju podłużnego wału maszyny. Wszystkie wymiary podane na rysunku są w [mm].



Rys. 9.6 Widok zarysu przekroju podłużnego wału maszyny

9.2.5 Uzwojenie stojana silnika

Na podstawie założeń przyjętych w obliczeniach i literatury dotyczącej uzwojeń silników indukcyjnych [9] przyjęto schemat uzwojenia silnika przedstawiony na rysunku (rys. 9.7)



Rys. 9.7 Schemat uzwojenia stojana rozważanego silnika: $p=2$, $y_1=11$, $y_2=9$, $y_3=7$, $Q_s=36$, $q=3$

9.2.6 Podsumowanie wyników obliczeń silnika

Powyższa procedura obliczeń prowadzi do wyznaczenia wymiarów silnika indukcyjnego klatkowego. Uzyskane tą metodą wymiary należy traktować jako dane wejściowe do analizy z zastosowaniem bardziej zaawansowanych narzędzi CAD np. programów do obliczeń pól elektromagnetycznych, termicznych i naprężeń mechanicznych. Dopiero tak zweryfikowane dane mogą stanowić podstawę do budowy prototypu i badań laboratoryjnych.

9.2.7 Literatura

1. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa, 1988
2. Bieńkowski K.: *Materiały dydaktyczne*. <http://www.ime.pw.edu.pl/zme/dyd/mater/kme/>
3. Kenig E.: *Maszyny elektryczne*, PWN, Warszawa; Poznań, 1970
4. Kopczyński W.: *Obliczenia silników asynchronicznych*, Wyd. Sp. Akc. „ELEKTROBUDOWA”, Łódź, 1938
5. Latek W.: *Teoria maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1987
6. Plamitzer A. M.: *Maszyny elektryczne*, WNT, Warszawa, 1982
7. Postnikov E. M.: *Projektirovanije elektricskich Masin*, Gos. Izd. Techniceskoj Literatury USSR, 1 izdaniye Kijev 1952, 2 izdaniye Kijev 1960
8. Węglarz J.: *Maszyny elektryczne*, WNT, Warszawa, 1968
9. Zembrzusi J.: *Atlas uzwojeń silników indukcyjnych*, WNT, Warszawa, 1988

9.3 Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi

Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi wykonano odpowiednio modyfikując silnik indukcyjny. Założono, że stojan silnika indukcyjnego wraz z uzwojeniami pozostawiony zostanie bez zmian. Główna modyfikacja konstrukcji silnika będzie polegała na wymianie wirnika klatkowego na wirnik z powierzchniowo zamocowanymi magnesami trwałymi. Zastosowano wysokoenergetyczne (neodymowe NdFe₂, lub samarowo-kobaltowe SmCo) magnesy trwałe w kształcie wycinków pierścienia. Magnesy zostaną przyklejone do powierzchni zewnętrznej wirnika i w razie konieczności zabezpieczone pierścieniem lub bandażem przed działaniem sił odśrodkowych.

Podstawowym zadaniem jest zaprojektowanie silnika z magnesami trwałymi o parametrach eksploatacyjnych nie gorszych niż silnika indukcyjnego. W związku z tym dobór struktury obwodu magnetycznego wirnika ma na celu uzyskanie wartości amplitudy pierwszej harmonicznej rozkładu indukcji w szczelnie powietrznej na poziomie indukcji uzyskanej w silniku indukcyjnym.

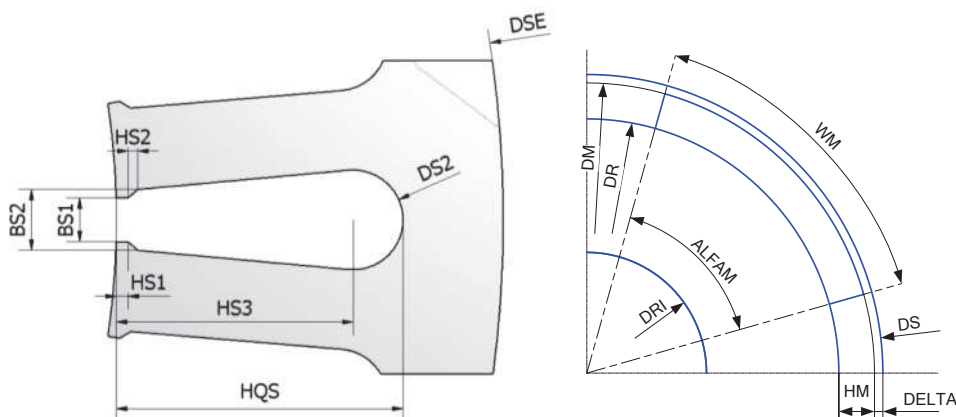
9.3.1 Dane wejściowe do obliczeń silnika

Punktem wyjścia do obliczeń silnika z magnesami trwałymi są dane katalogowe, konstrukcyjne oraz materiałowe silnika indukcyjnego TAMEL SG100L4A (tabela 9.7).

Tabela 9.7 Dane katalogowe silnika TAMEL SG100L4A

Typ silnika	Sg100L-4A
Częstotliwość (Hz)	50
Liczba faz	3
Moc (kW)	2.20
Prędkość obrotowa	1420
Prąd (A) przy 380V	5.00
Sprawność	81.00
Współczynnik mocy	0.82
Krotność momentu rozruchowego	2.20
Krotność prądu rozruchowego	5.50
Stosunek mocy maks. do min.	2.60
Liczba biegunów	4
Moment bezwładności (kgm ²)	0.00670

Wymiary stojana pozostały takie same jak w przypadku projektu silnika indukcyjnego (rys. 9.8).



Rys. 9.8 Oznaczenie wymiarów żłobka stojana oraz wymiarów wirnika silnika z magnesami trwałymi

Przyjęto następujące dane wejściowe do obliczeń:

Tabela 9.8 Dane wejściowe do obliczeń

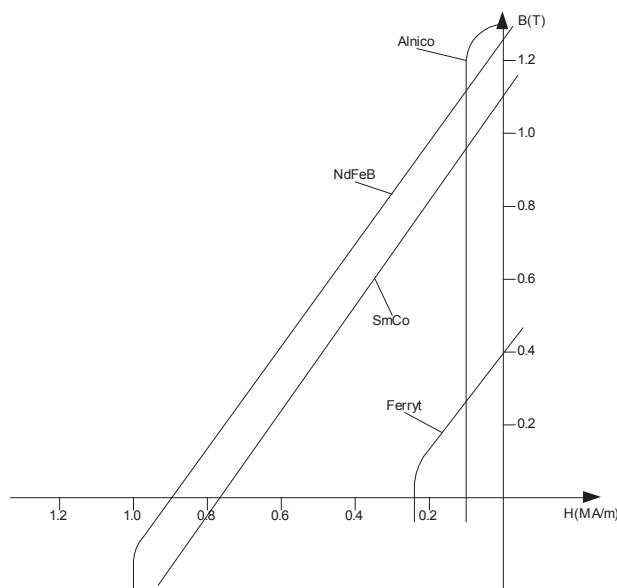
Wielkość	Symbol	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa	P_n	2,2	kW
Napięcie fazowe	U_{1n}	380	V
Częstotliwość	f_n	50	Hz
Liczba faz	m_s	3	-
Prędkość synchroniczna	n_s	1500	1/min
Liczba par biegunów	p	2	-
Średnica zewnętrzna stojana	D_{se}	153	mm
Średnica wewnętrzna stojana	D_s	94	mm
Średnica wewnętrzna wirnika	D_{ri}	33	mm
Długość stojana	l_s	96	mm
Liczba żłobków stojana	Q_s	36	-
Szerokość otwarcia żłobka	b_{s1}	2,2	mm
Szerokość żłobka	b_{s2}	3,9	mm
Wysokość otwarcia żłobka	h_{s1}	2,0	mm

9.3.2 Materiały magnetyczne trwałe

Stosowane najczęściej w maszynach elektrycznych magnesy trwałe można podzielić na kilka podstawowych grup w zależności od rodzaju zastosowanego materiału magnetycznie trwałego oraz technologii ich wykonania (odlewanie, spiekanie, spajanie tworzywem). Wśród materiałów wykorzystywanych do budowy magnesów można wyróżnić:

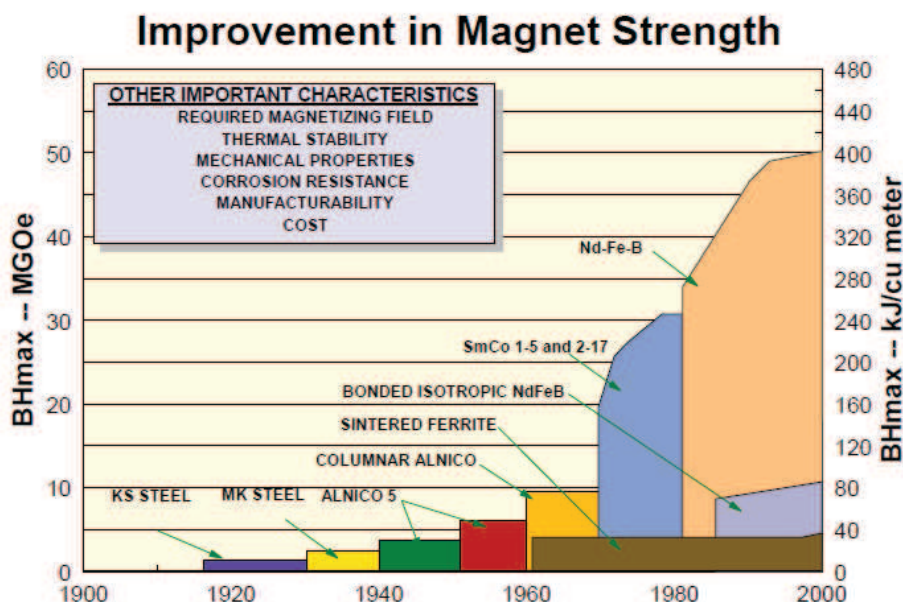
- magnesy ceramiczne: ferryty baru ($BaFe_{12}O_{19}$) oraz ferryty strontu ($SrFe_{12}O_{19}$),
- magnesy z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich: samorowo-kobaltowe ($SmCo_2$) oraz neodymowe ($Nd_2Fe_{14}B$).

Podstawowe właściwości fizyczne magnesu, takie jak indukcja remanencji (B_r) czy natężenie pola koercji (H_c) można odczytać z części pętli histerezy $B=f(H)$ leżącej w drugiej ćwiartce nazywanej charakterystyką odmagnesowania (rys. 9.9).



Rys. 9.9 Charakterystyki odmagnesowania magnesów trwałych

Wartość gęstości energii pola magnetycznego wzbudzonej magnesami trwałymi przedstawia iloczyn BH – w katalogach podawana jest wartość maksymalna energii na jednostkę objętości $(BH)_{max}$ (tabela 9.9).



Rys. 9.10 Gęstości energii magnesów trwałych [14]

Tabela 9.9 Właściwości materiałów magnetycznych stosowanych do budowy magnesów trwałych

			SmCo5	NdFeB	feryt	AlNiCo
Indukcja remanencji	B_r	[T]	0.85 – 1	1 – 1.41	0.3 – 0.45	1.25
Gęstość energii	$(BH)_{max}$	[kJ/m ³]	145 – 200	200 – 420	20 – 40	50
Natężenie koercji	BH_c	[kA/m]	>1600	1040 - 3000	240 – 320	55
Dopuszczalna temp.	T_{max}	[°C]	250	80 – 200	150 – 200	450 - 500
Cena	-	[€/kg]	120	50 €/kg	15-20 €/kg	

Z punktu widzenia projektowania maszyn elektrycznych najbardziej interesującymi parametrami charakteryzującą się magnesy wykonane z domieszkami pierwiastków z ziem rzadkich. Posiadają one największą wartość gęstości energii (BH_{max}) co oznacza, że stosując takie magnesy można zasadniczo zmniejszyć rozmiar magnesu, a więc i gabaryty maszyny. Duże wartości natężenia pola koercji zapewniają odpowiednią wytrzymałość w przypadku oddziaływania odmagnesowującego (zwarcia). Wartości indukcji w szczelnicy maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi mogą osiągnąć wartości rzędu 0,8-1T i ograniczone są maksymalnymi wartościami indukcji w zębach stojana. Magnesy wykonane z tych materiałów są jednak stosunkowo kruche, ograniczony jest również zakres dopuszczalnych temperatur pracy.

Do obliczeń przyjęto parametry magnesu samarowo-kobaltowego SmCo o oznaczeniu S18 13

Tabela 9.10 Parametry magnesów trwałych

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
1	Dobrano magnes trwały			SmCo S18	
2	Indukcja remanencji	B_r		0,95	T
3	Natężenie koercji	H_c		670	kA/m
4	Przenikalność magnetyczna względna	μ_r	$B_r/(\mu_0 H_c)$	1,13	-

9.3.3 Szczelina powietrzna/robocza silnika

Dobór wysokości szczeliny powietrznej i wysokości magnesu trwałego jest ze sobą związany w procesie wyznaczania punktu pracy magnesu trwałego. Przenikalność magnetyczna magnesów trwałych (neodymowych) jest w przybliżeniu równa przenikalności powietrza, co oznacza, że wysokość magnesu trwałego powiększa efektywną szczelinę powietrzną. Większa szczelina powietrzna wymaga zastosowania wyższych magnesów trwałych w celu uzyskania oczekiwanej wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie. Oznacza to zarówno zwiększenie całkowitych kosztów maszyny jak i zmniejszenie indukcyjności magnesowania. Z drugiej strony zwiększenie szczeliny powietrznej skutkuje bardziej sinusoidalnym rozkładem indukcji w szczelnie i zmniejszeniem strat z uwagi na prądy wirowe, zmniejszeniem rozmagnesowującego oddziaływania twornika oraz ograniczeniem momentu zaczepowego.

Rzeczywista szczelina powietrzna w maszynach z magnesami trwałymi wynosi od 1 do 3 mm (z uwzględnieniem pierścienia lub bandaża mocującego). Przyjęto wysokość szczeliny powietrznej:

Tabela 9.11 Wysokość szczeliny powietrznej

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
5	Wysokość szczeliny powietrznej	δ	-	1,0	mm

W dalszych obliczeniach uwzględnia się użłobkowanie stojana przez wprowadzenie współczynnika Carter'a, o który powiększa się szczelinę powietrzną.

Tabela 9.12 Obliczenia współczynnik Cartera i zastępczej szczeliny powietrznej

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
6	Podziałka żłobkowa	τ_s	$\pi D_s / Q_s$	8,2	mm
7	Wsp. otwarcia żłobka	k_{open}	b_{s1} / b_{s2}	0,56	-
8		γ_s	$b_{s2} k_{open} / 2\delta$	1,1	-
9		κ	$\frac{4}{\pi} (\gamma_s \operatorname{atan}(\gamma_s) - \ln(\sqrt{1 + \gamma_s^2}))$	0,66	-
10	Wsp. Carter'a	k_{Carter}	$\tau_s / (\tau_s - \kappa\delta)$	1,1	-
11	Szczelina zastępcza	δ_e	$k_{Carter}\delta$	1,1	mm

9.3.4 Punkt pracy magnesów trwałych silnika

W celu wyznaczenia punktu pracy magnesu trwałego przyjęto następujące założenia upraszczające:

- jarzmo stojana i jarzmo wirnika posiadają nieskończenie wielką przenikalność względną,
- szczelina robocza ma stałą długość na całej szerokości magnesu,
- prostokątny przebieg indukcji w szczelnie,
- jednorodny rozkład indukcji w magnesie.

Charakterystykę odmagnesowania magnesów trwałych można aproksymować prostą o równaniu:

$$B_m(H_m) = B_r \left(1 + \frac{H_m}{H_c}\right) B_m(H_m) = B_r \left(1 + \frac{H_m}{H_c}\right) \quad (9.1)$$

Równanie przepływu dla uproszczonego modelu obwodu magnetycznego szczelina-magnes:

$$H_m h_m + H_\delta \delta = 0 \quad (9.2)$$

Uwzględniając zależność na indukcję magnetyczną w szczelnie

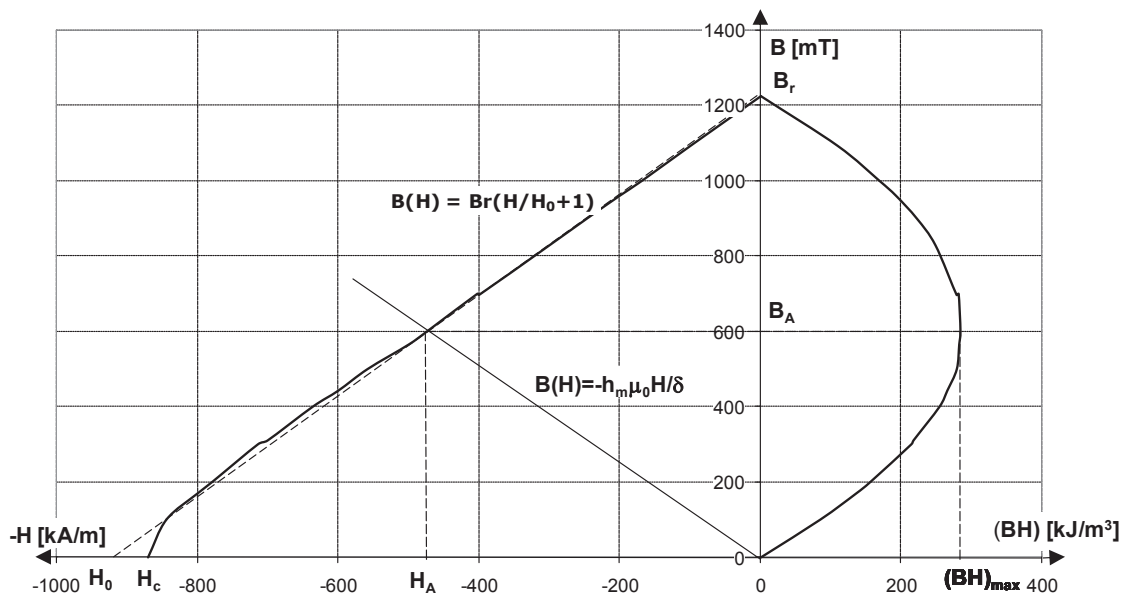
$$B_\delta = H_\delta \delta \quad (9.3)$$

oraz zakładając stałość strumienia przenikającego magnes i szczelinę można wyznaczyć zależności opisujące punkt pracy magnesu trwałego:

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \sigma_{lm} \mu_r \frac{\delta_e}{h_m}} \quad (9.4)$$

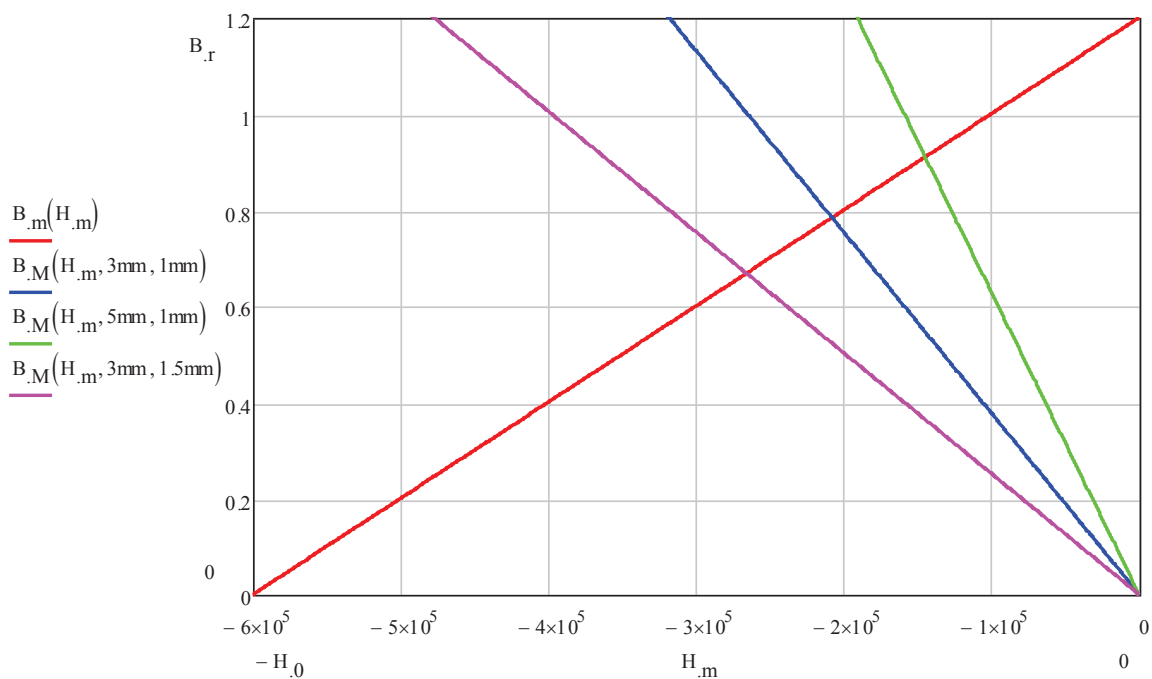
$$H_m = \frac{H_c}{1 + \frac{1}{\sigma_{lm} \mu_r} \frac{h_m}{\delta_e}} \quad (9.5)$$

Wartość indukcji w szczelnie wyznacza punkt przecięcia charakterystyki odmagiesowania i prostej szczeliny (rys. 9.11).



Rys. 9.11 Graficzne wyznaczenie punktu pracy magnesu trwałego

Punkt pracy magnesu trwałego zależy od stosunku wysokości szczeliny powietrznej do wysokości magnesu trwałego (rys. 9.12)



Rys. 9.12 Wpływ wysokości magnesu trwałego i szczeliny powietrznej na punkt pracy magnesu trwałego

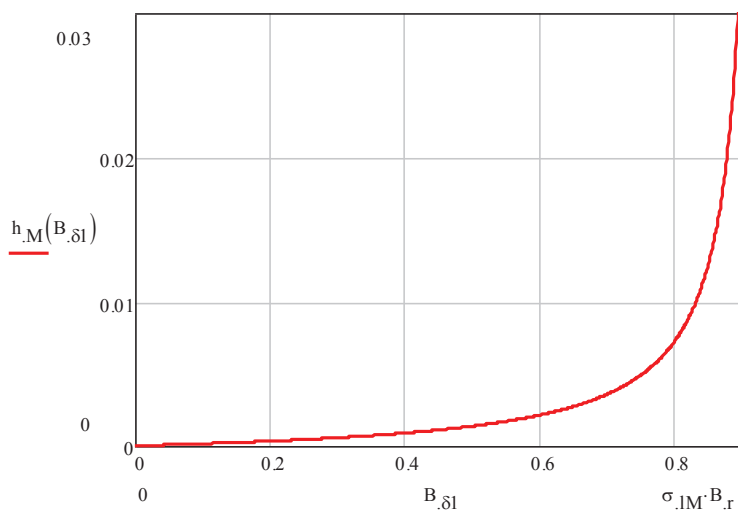
9.3.5 Dobór wysokości magnesów trwałych silnika

Proces doboru wysokości magnesów trwałych pokazano poniżej (tabela 9.13).

Tabela 9.13 Dobór wysokości magnesu trwałego

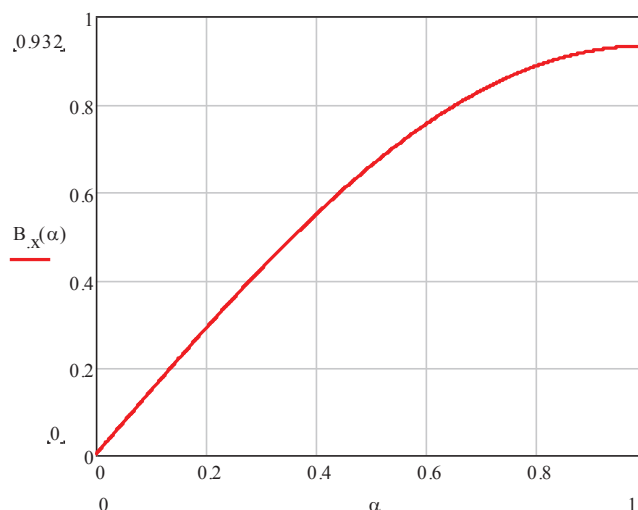
LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
12	Średnica zewnętrzna magnesów trwałych	D_m	$D_s - 2\delta$	92	mm
13	Podziałka biegunowa magnesów	τ_m	$\frac{\pi D_m}{2p}$	72,3	mm
14	Wsp. zapełnienia podziałki biegunowej	α_m		0,6	-
15	Szerokość magnesu trwałego	w_m	$\tau_m \alpha_m$	43,4	mm
16	Wsp. rozproszenia magnesów trwałych	σ_{lm}		0,95	-
17	Amplituda 1 harmonicznej indukcji	$B_{\delta 1}$		0,76	T
18	Wysokość magnesu trwałego	h_m	$\frac{\mu_r \delta_e \sigma_{lm}}{4 \frac{\sigma_{lm} B_r}{\pi B_{\delta 1}} \sin(\frac{\pi \alpha_m}{2}) - 1}$	5,2	mm
19	Dobrano wysokość magnesu trwałego	h_m		5	mm
20	Indukcja w magnesie	B_m	$\frac{B_r}{1 + \sigma_{lm} \mu_r \frac{\delta_e}{h_m}}$	0,77	T
21	Strumień wzbudzony przez magnes	Φ_m	$B_m w_m l_s$	3,23e-3	Wb

Wpływ zależności wysokości magnesu trwałego (h_m) od przyjętej wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie pokazano na rys. 9.13.



Rys. 9.13 Zależność pomiędzy wysokością magnesu trwałego i wartością amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie

Zwiększając szerokość magnesu trwałego, tak by zajmował całą podziałkę biegunową ($\alpha_m=1$) uzyskamy jedynie 24% wzrost amplitudy pierwszej harmonicznej rozkładu indukcji (rys. 9.14). Jednocześnie całkowita objętość magnesów trwałych jak i ich cena wzrosną o 67% ($1/\alpha_m$).



Rys. 9.14 Wpływ szerokości magnesu trwałego na wartość amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelnie

9.3.6 Wysokość jarzma wirnika

Minimalna wysokość jarzma wirnika została wyznaczona przy założeniu, że strumień wzbudzony przez magnes trwały zamknie się przez jarzmo wirnika.

Tabela 9.14 Wysokość jarzma wirnika

LP	Wielkość	Symbol	Wyrażenie	Wartość	Jednostka
22	Współczynnik zapełnienia pakietu wirnika	k_{fe}		0,95	-
23	Długość obliczeniowa pakietu wirnika	l_{fe}	$k_{fe}l_s$	91	mm
24	Maksymalna wartość strumienia w jarzmie wirnika	Φ_{yr}	$\frac{\Phi_m}{2}$	1,6e-3	Wb
25	Maksymalna wartość indukcji w jarzmie wirnika	B_{yr}		1,3	T
26	Minimalna wysokość jarzma wirnika	h_{yr}	$\frac{\Phi_{yr}}{B_{yr}l_{fe}}$	14	mm

9.3.7 Sprawdzenie wymiarów wirnika

Z założeń projektu wynika, że wymiary wirnika ograniczone są przez średnicę wewnętrzną stojana (D_s) oraz średnicę wałka (D_{ri}). W przestrzeni tej powinny znaleźć się szczelina powietrzna, magnes trwały oraz jarzmo wirnika czyli powinna być spełniona nierówność:

$$\frac{D_s - D_{ri}}{2} \geq \delta + h_m + h_{yr} \quad (9.6)$$

Sprawdzenie dla obliczonych wymiarów:

$$\frac{D_s - D_{ri}}{2} = \frac{94 - 33}{2} = 31 \text{ mm}$$

$$\delta + h_m + h_{yr} = 1 + 5 + 14 = 20 \text{ mm}$$

Nierówność (9.6) jest spełniona.

9.3.8 Podsumowanie wyników obliczeń silnika

Przedstawione wyniki potwierdzają możliwość budowania maszyn z magnesami trwałymi w oparciu o elementy seryjnie produkowanych maszyn indukcyjnych. Za takim rozwiązaniem przemawia możliwość szybkiego przestawienia produkcji przy wykorzystaniu istniejącego parku maszynowego oraz opracowanych technologii wytwarzania części silników indukcyjnych.

Wirnik silnika indukcyjnego składa się z uzwojeń klatki oraz jarzma wirnika i powinien teoretycznie zajmować więcej miejsca niż wzbudzenie silnika z magnesami trwałymi. Projektując silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi z wykorzystaniem części konstrukcyjnych silnika indukcyjnego tracimy atut możliwości zmniejszenia objętości wirnika. Wymiary wirnika określa średnica wewnętrzna stojana, wysokość szczeliny powietrznej oraz magnesów trwałych. W konsekwencji znaczna część wirnika jest nie wykorzystana. Przy takim podejściu do projektowania, gdzie głównym priorytetem jest minimalizacja kosztów, można rozważyć zastosowanie tańszych magnesów trwałych o gorszych parametrach (ferrytowych).

9.3.9 Literatura

10. Gieras J.F.: Mitchell Wing, *Permanent Magnet Motor Technology, 2nd ed.* Marcel Dekker, Inc, 2002
11. Hendershot J.R., Miller T.J.E. : *Design of brushless permanent-magnet motors.* Hillsboro, OH:Magna Pysics Pub. ; Oxford : Clarendon Press, 1994
12. Hanselman D.: *Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd ed.* McGraw-Hill, New York, 1994.
13. MMC Magnetics Mateirals and Components www.mmcmagnetics.com
14. Arnold Magnetics www.arnoldmagnetics.com

9.4 Podsumowanie

Silniki indukcyjne klatkowe i silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi (BMT) są obecnie najchętniej stosowanymi silnikami w zaawansowanych układach napędowych. Z uwagi na brak elektrycznych styków ruchomych (komutatora, pierścieni, szczotek) mogą być uważane za silniki niezawodne. Silnik BMT umożliwia osiągnięcie większej mocy przy zadanej objętości oraz wyższej sprawności. Głównym ograniczeniem rozpowszechnienia się tego typu silników jest ich wysoka cena związana z zastosowaniem drogich magnesów neodymowych (tabela 9.15).

Tabela 9.15 Porównanie cech silników indukcyjnych klatkowych i silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi

	Silnik indukcyjny	Silnik BMT
Sprawność	Średnia (70-96%)	Wysoka (93-95%)
wsp. mocy	0,7 - 0,86	>0,94
straty mocy	stojan i wirnik	stojan
szczelina powietrzna	mała, harmoniczne żłobkowe, hałas	duża
wsp. moc/masa	średni (75W/kg)	duży (160W/kg)
konstrukcja wirnika	prosta, wytrzymała	prosta lub złożona, podatność MT na siły odśrodkowe
cena	niska	wysoka