

Wyniki projektu badawczo-rozwojowego

„Opracowanie technologii produkcji bezszczotkowego silnika elektrycznego wykonanego w technologii BLPM”

RPWP.01.02.00-30-0075/19

mgr inż. Roman Wrzalski

1. Wstęp

Znaczna degradacja środowiska naturalnego wywołana działalnością człowieka w ostatnim stuleciu wywołała konieczność poszukiwania rozwiązań energooszczędnych, bowiem wytwarzanie energii elektrycznej opartej w wielu krajach na zasobach kopalnianych tak jak w naszym kraju, to przyczyna wysokiej emisji CO₂ do atmosfery będącej bezpośrednią przyczyną bardzo niebezpiecznego zjawiska ocieplenia klimatu.

Podjęte działania na rzecz stopniowego ograniczania emisji gazów cieplarnianych mają charakter dwutorowy, jeden polega na stopniowym odchodzeniu od przestarzałych i nie ekologicznych technologii wytwarzania energii elektrycznej zastępując je odnawialnymi źródłami energii. Jest jednak to proces na chwilę obecną bardzo kosztowny i co najważniejsze długotrwały. Dlatego też równolegle powstają rozwiązania mające na celu ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i innych towarzyszących zanieczyszczeń pośrednio, poprzez zastosowanie rozwiązań energooszczędnych w dziedzinie ogrzewania, oświetlenia czy wreszcie w szeroko pojętej technice napędowej.

Przedstawionym pokrótce powyższym problemom naprzeciw wychodzi konstrukcja silnika w technologii BLPM (ang. *Brush Less Permanent-Magnet*). Maszyny elektryczne, w których część ruchoma (wirnik) zbudowana jest z magnesów trwałych, zamiast uzwojeń jak w silnikach komutatorowych, bądź odlewanych klatek jak w klasycznych silnikach indukcyjnych pozwala uzyskać praktycznie stały w całym zakresie prędkości moment obrotowy, co wraz z elektronicznym komutatorem umożliwia płynną regulację tejże prędkości predysponując to rozwiązanie w wielu układach napędowych zwłaszcza w zespołach wentylacji i klimatyzacji, czy w podajnikach szeroko jeszcze stosowanych kotłów na paliwa stałe. Wspomniana budowa wirnika pozwala na wyeliminowanie znacznego źródła strat (drugiego pod względem wielkości) w silnikach indukcyjnych i komutatorowych, ponieważ pole elektromagnetyczne niezbędne do wytworzenia momentu obrotowego uzyskujemy za pomocą materiału naturalnie posiadająca taką właściwość, w przeciwieństwie do nawijanych wirników, bądź odlewanych klatek w których owe pole elektromagnetyczne powstaje w wyniku przepływu prądu elektrycznego często o dużych wartościach natężenia, co z kolei jest powodem znaczących strat w maszynie.

Uwzględniając nakreślone wymagania i związane z tym nowe potrzeby w układach napędowych zrodziła się konieczność opracowania w Wielkopolskiej Fabryce Silników Elektrycznych PPHU MEBLOMARK Zygmunt Daszczyk, maszyny elektrycznej o wysokiej sprawności będącej alternatywą do stosowanych dotychczas rozwiązań. Przedmiotem niniejszej publikacji zawierającej wyniki badań i wnioski ze zrealizowanego projektu, jest silnik BLPM przeznaczony szczególnie do nowoczesnych i ekologicznych zespołów wentylacyjnych, jak również do podajników w kotłach centralnego ogrzewania najwyższych klas energetycznych.

2. Założenia projektowe

Nowy typ silnika, który miał stanowić alternatywę spełniającą coraz surowsze wymogi musiał być w pełni kompatybilny ze stosowanym już modelem, tak aby zastosowanie nowej konstrukcji nie wymuszało zmian zarówno w strukturze mechanicznej jak i elektrycznej napędu, w którym ma pracować.

Należy również nadmienić, iż wykorzystanie elementów produkowanego seryjnie już silnika indukcyjnego, prócz zapewnienia wymienialności, z perspektywy producenta dało możliwość wykorzystania istniejącego parku maszynowego, asortymentu części itp., co znacząco obniżyło koszty nowego projektu, a tym samym jeszcze bardziej uzasadniło ekonomicznie cel jego zastosowania.

2.1. Zakładane parametry elektryczne silnika

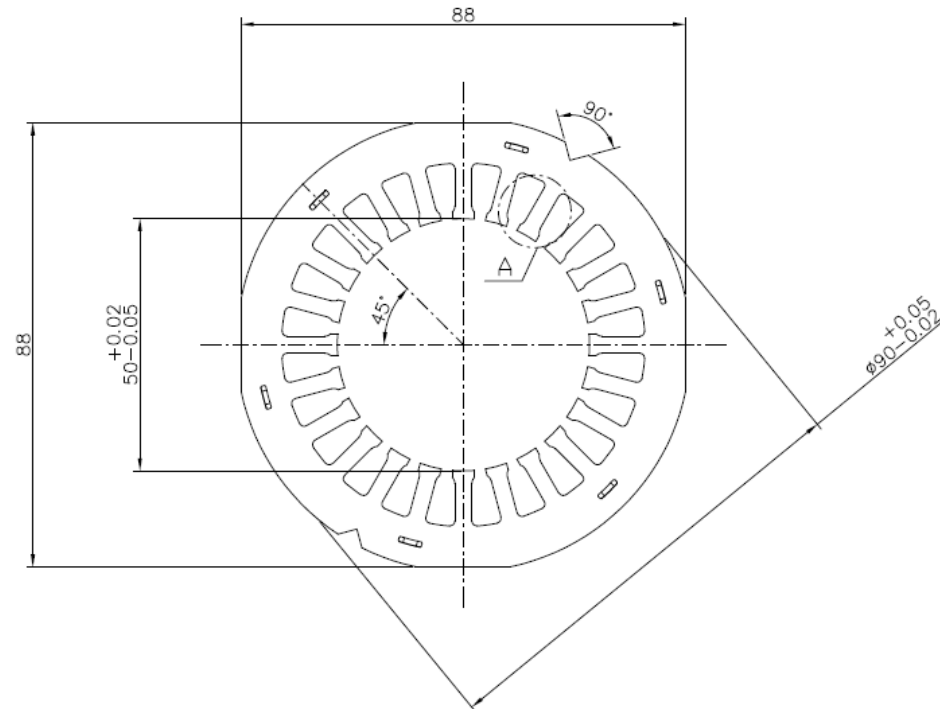
Projekt nowego modelu poprzedzony został głęboką analizą dostępnej na ten temat literatury, w wyniku czego uznano, iż w oparciu o stosowany już w zakładzie typ blachy najkorzystniejszy będzie to silnik 8 biegunowy o rozłożonym uzwojeniu jednowarstwowym. Do obliczeń projektowych jako dane wejściowe przyjęto parametry zamieszczone w tabeli 2.1.

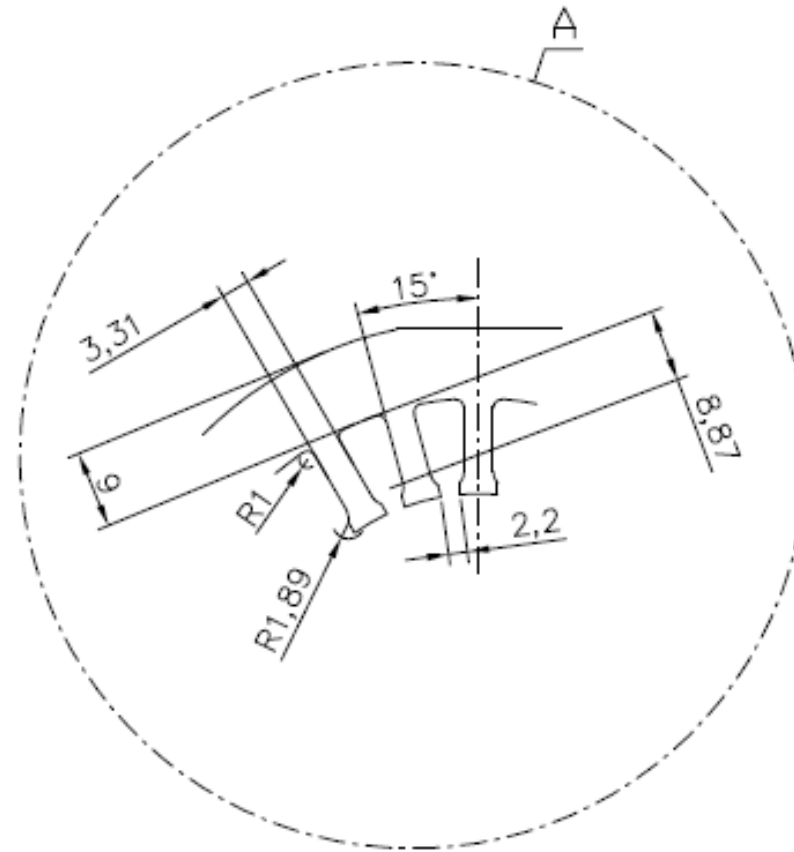
Tabela 2.1. parametry silnika dla pracy ciągłej S1.

Parametr	Wartość	J.m.
Moc znamionowa P_N	100	W
Moment znamionowy M_N	0,9	Nm
Moment rozruchowy M_r	0,95	Nm
Sprawność η	80	%
Prędkość znamionowa n	1000	rpm
Liczba biegunów $2p$	8	
Napięcie znamionowe U_n	400	V

2.2. Rozmiary mechaniczne silnika

Uwzględniając dostępność i maksymalne wykorzystanie komponentów już produkowanych silników, uzwojenia stojana projektowanej maszyny na pakiecie blachy elektrotechnicznej M400-50A o rozmiarach 90x50x45, 24 żłobki, o powierzchni 50,1mm², odpowiadającym wielkości mechanicznej silnika WM63, szczegóły kształtki przedstawia rysunek 2.1. Z kolei jego charakterystykę elektromagnetyczną zamieszczono na rysunku 2.2.

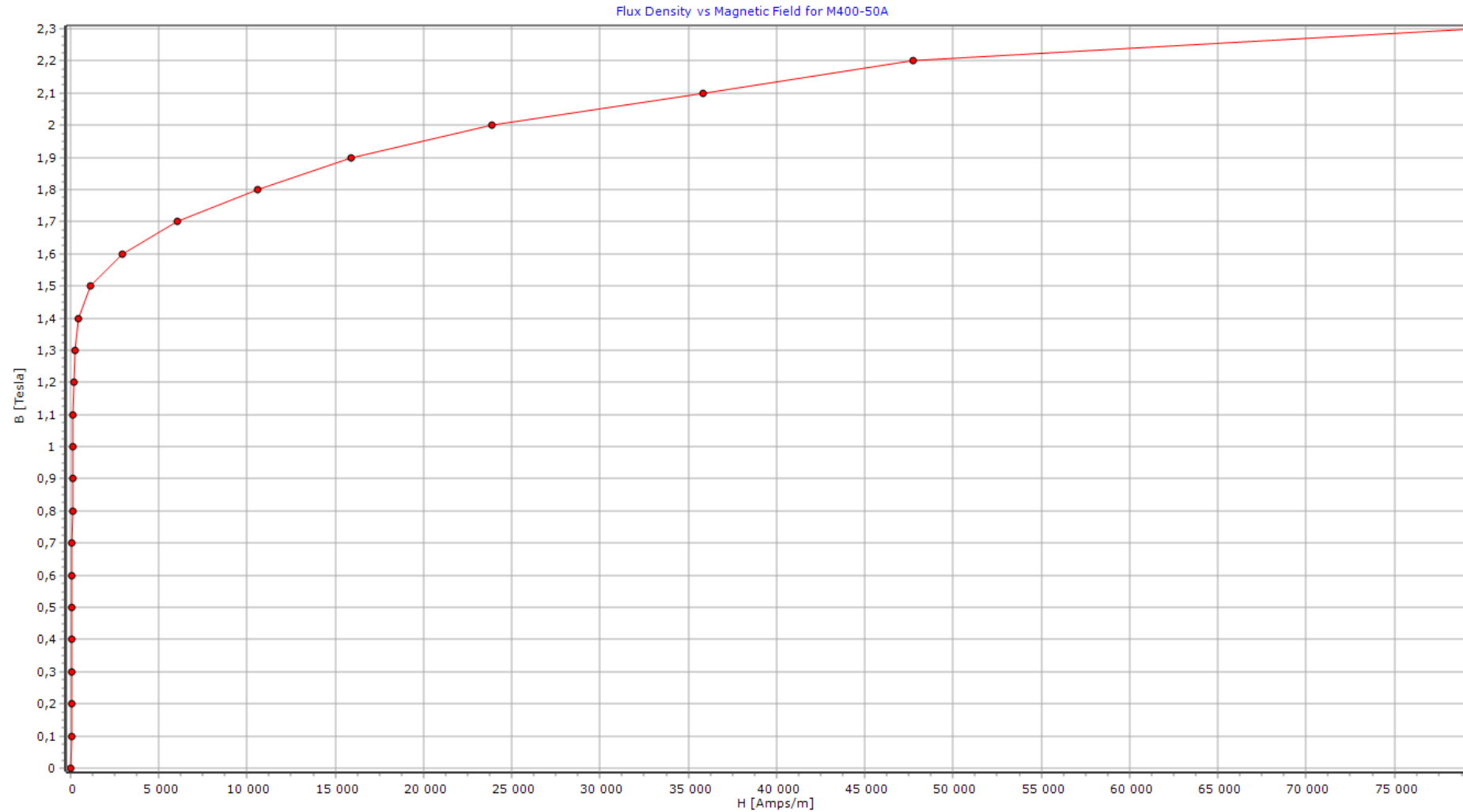




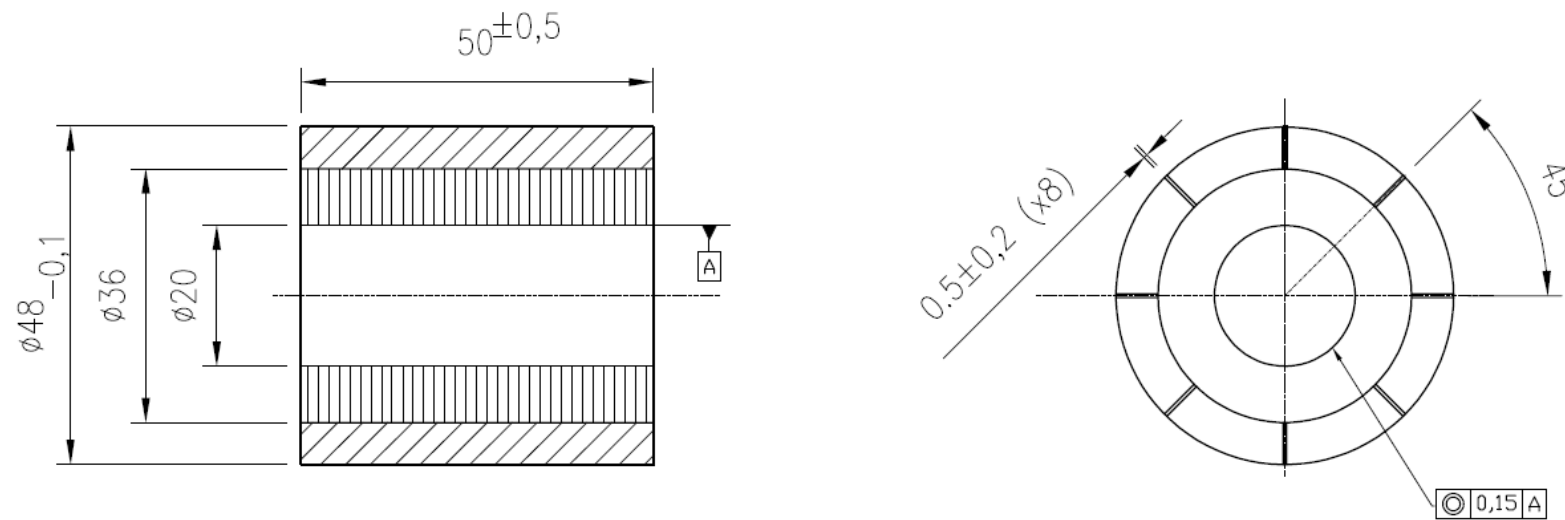
Rys. 2.1. Pakiet stojana projektowanego silnika.



Rys. 2.2. Charakterystyka elektromagnetyczna blachy elektrotechnicznej M400-50A.

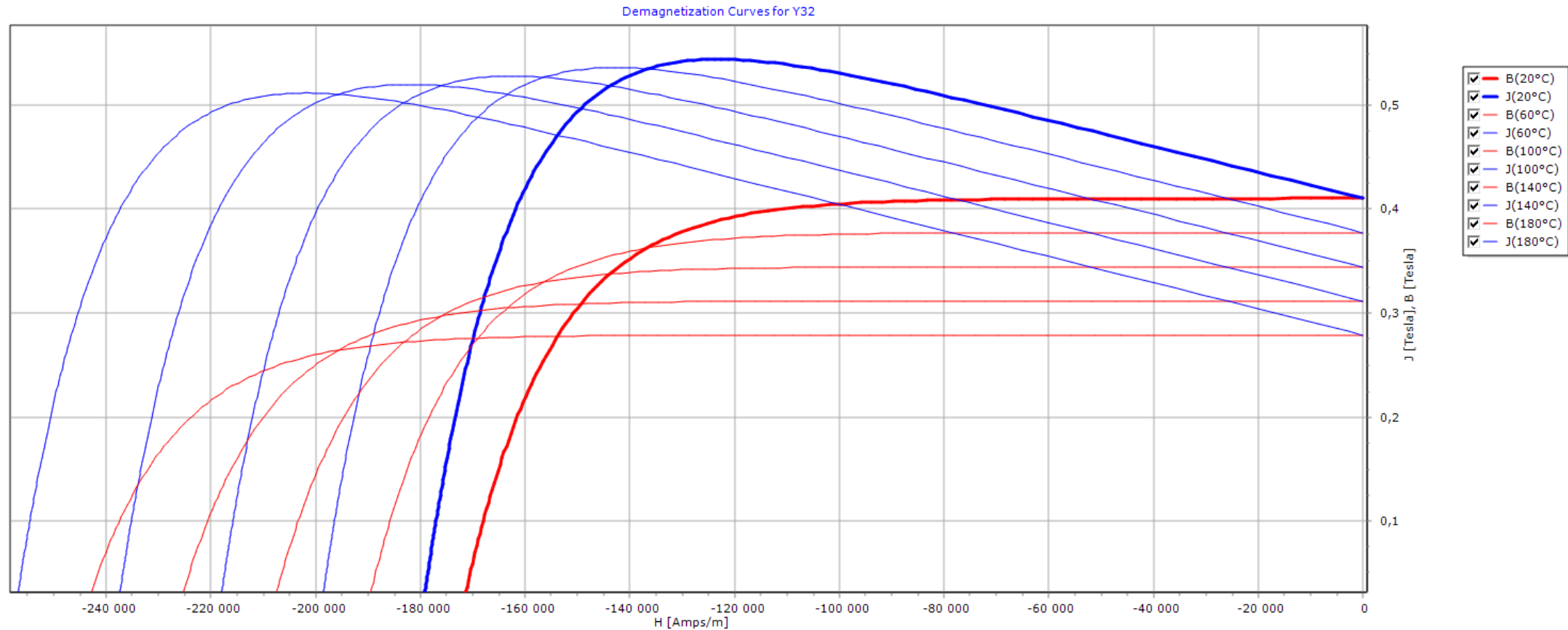


Część ruchomą silnika stanowi wirnik z ośmiu segmentów magnesów trwałych o indukcji remanencji $B_r = 0,4T$ klejonych na stalowej tulei, a całość osadzona została na wale ze stali C45 (patrz rysunek 2.3). Trwałość właściwości magnetycznych wybranego do obliczeń materiału przedstawia rysunek 2.4. Całość zamontowanie zostaną w aluminiowym korpusie o gabarytach odpowiadające znormalizowanej wielkości mechanicznej WM63.



Rys. 2.3. Wymiary wirnika magnetycznego

Rys. 2.4. Charakterystyki $B=f(H)$ magnesowania dla podanych wartości temperatur.



3. Model numeryczny silnika

Nieodzownym elementem projektowania nowej maszyny elektrycznych był etap stworzenia modelu numerycznego opartego na przyjętych wcześniej warunkach brzegowych, co pozwoliło na weryfikację wielu parametrów przed etapem budowania prototypów i przeprowadzania często kosztownych badań.

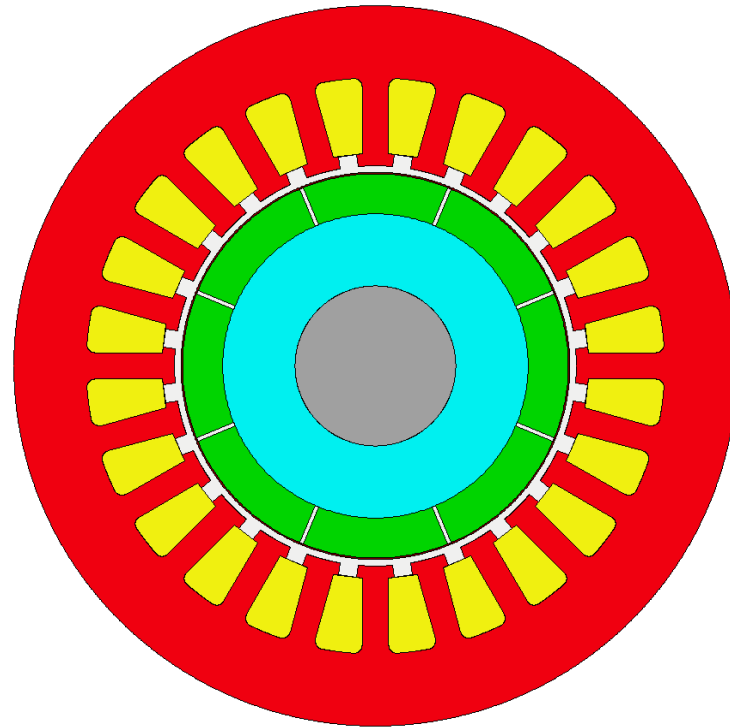
Firma MEBLOMARK posiada nowoczesne narzędzie do projektowania maszyn elektrycznych jakim jest Motor-CAD firmy ANSYS, oprogramowanie oparte zarówno na metodach analitycznych jak i polowo obwodowych umożliwiające wykreowanie aż czterech modeli silnika (elektromagnetyczny, mechaniczny, termiczny oraz laboratoryjny) i pozwalające na dogłębną analizę w wymienionych obszarach, w efekcie czego można było prototypować silnik, którego parametry były już bliskie seryjnemu.



3.1. Model elektromagnetyczny

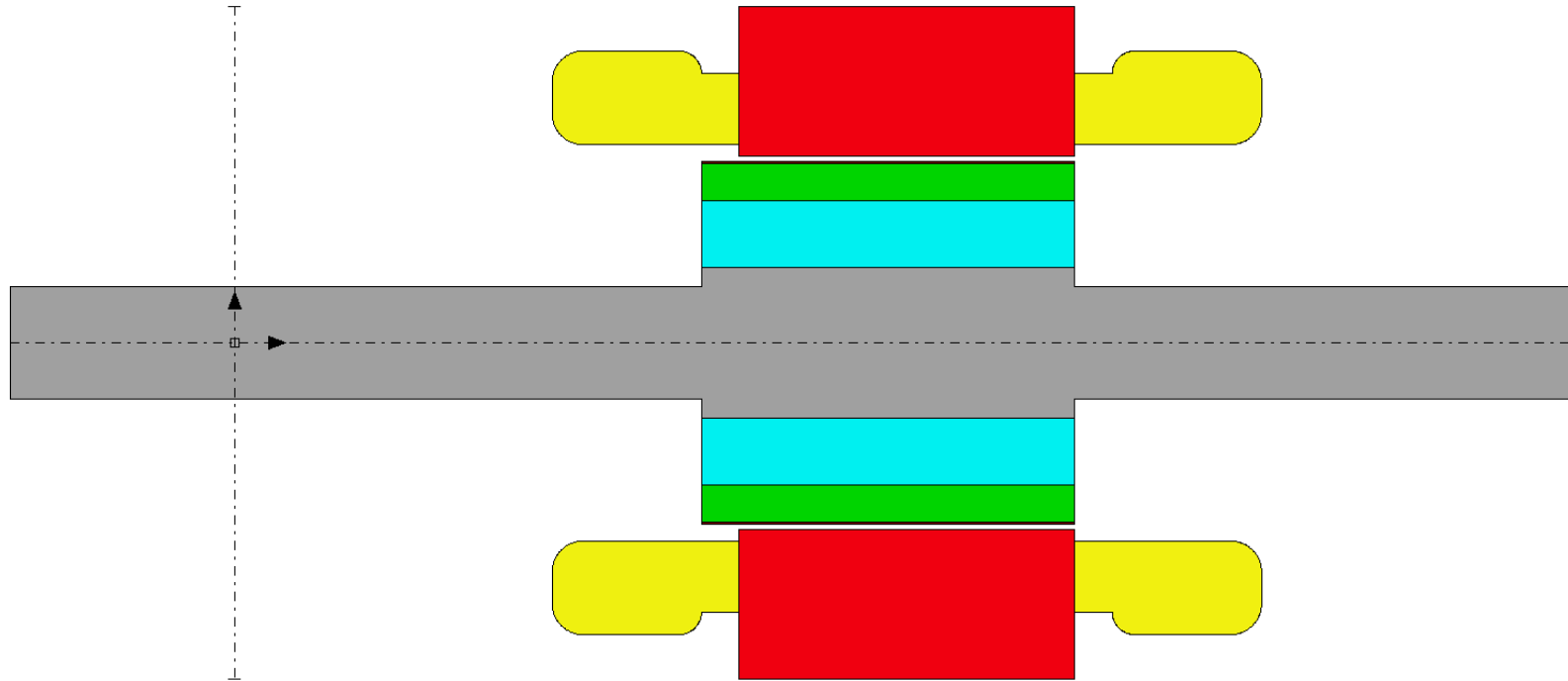
Oprogramowanie Motor-CAD umożliwiło obliczenie wydajności, strat i temperatur dla projektowanej maszyny elektrycznej. Osiągnięte wyniki można było łączyć bądź analizować osobno. W tym bloku analitycznym program uwzględnił silnik w postaci stojana wraz z wirnikiem bez obudowy jak przedstawiono na rysunku 3.1.

a)



b)

Motor-CAD



Rys. 3.1. Przyjęty do obliczeń elektromagnetycznych model maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi:
a) przekrój poprzeczny , b) przekrój osiowy.

W przekroju osiowym silnika widzimy wysunięcie wirnika ponad rdzeń stojana w kierunku czoła. Był to celowo zaimplementowany zabieg umożliwiający analizę silnika w jego przyszłych, rzeczywistych warunkach.

W maszynach wzbudzanych magnesami trwałymi niezbędna jest kontrola położenia wirnika względem określonych uzwojeń, w praktyce robi się to poprzez zamieszczenie czujników magnetycznych, bądź optycznych (transoptory szczelinowe) wokół wirnika, które odczytują zmienne pole magnetyczne w pierwszym przypadku, bądź zliczają impulsy związane z ruchem umieszczonych na wale chorągiewek. Na etapie koncepcji tegoż silnika założono najtańszy sposób kontroli położenia, w postaci czujników pola magnetycznego odczytujących ruch wysuniętego o 5 mm wirnika. Tego typu idea na etapie projektowym okazała się najskuteczniejsza i najtańsza zarazem.

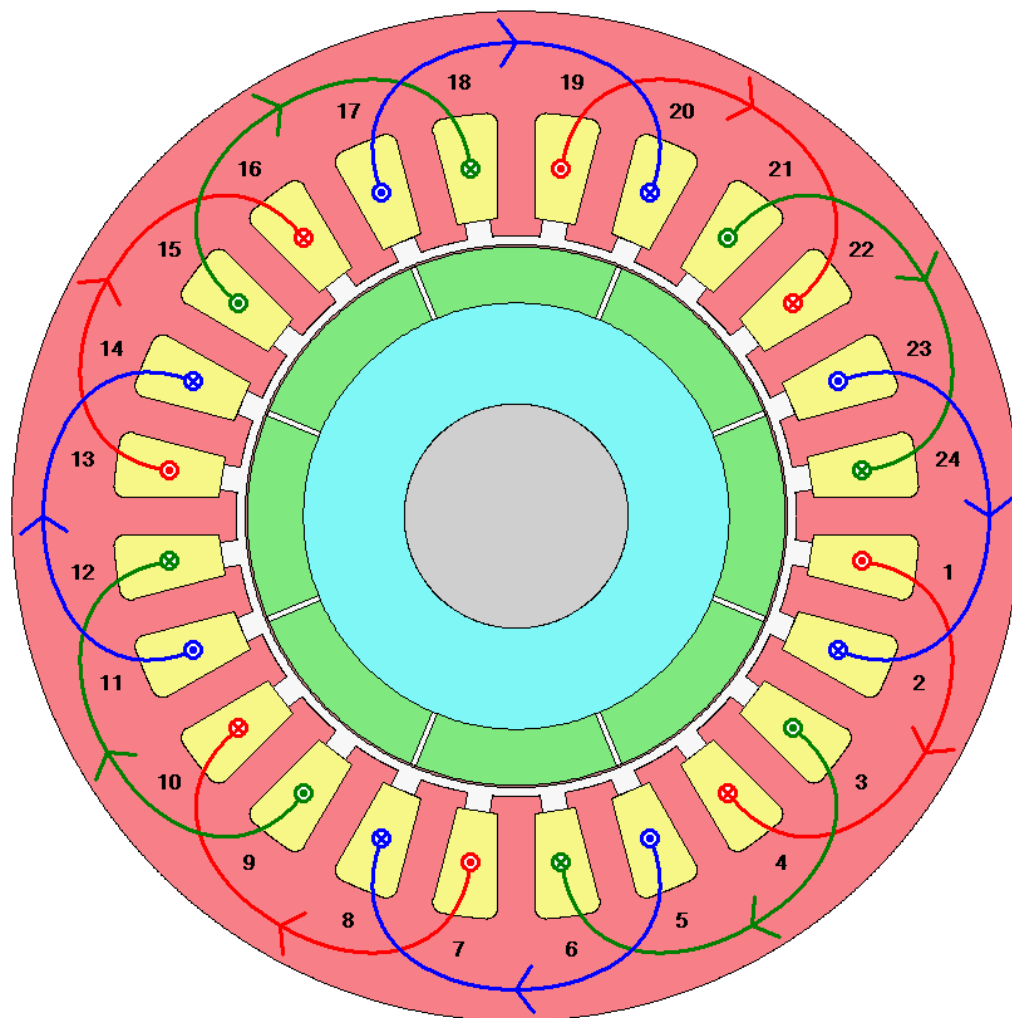
3.1.1. Uzwojenie stojana

Uzwojenie stojana to najważniejszy element każdego silnika, bowiem od rodzaju uzwojenia, jego rozkładzie, czy przekroju drutu w znacznym stopniu zależą oczekiwane osiągi maszyny elektrycznej. W omawianym przykładzie mając na uwadze stosowany już dotąd seryjnie kształt blachy elektrotechnicznej oraz dostępne maszyny do zwojenia wraz z oprzyrządowaniem, przyjęto model ośmiobiegunowy, jednowarstwowy równomiernie rozmieszczony (ze stałym poskokiem $y=4$) o współczynniku wypełnienia żłobka 0,4, co jest standardem w silnikach o tej wielkości mechanicznej.

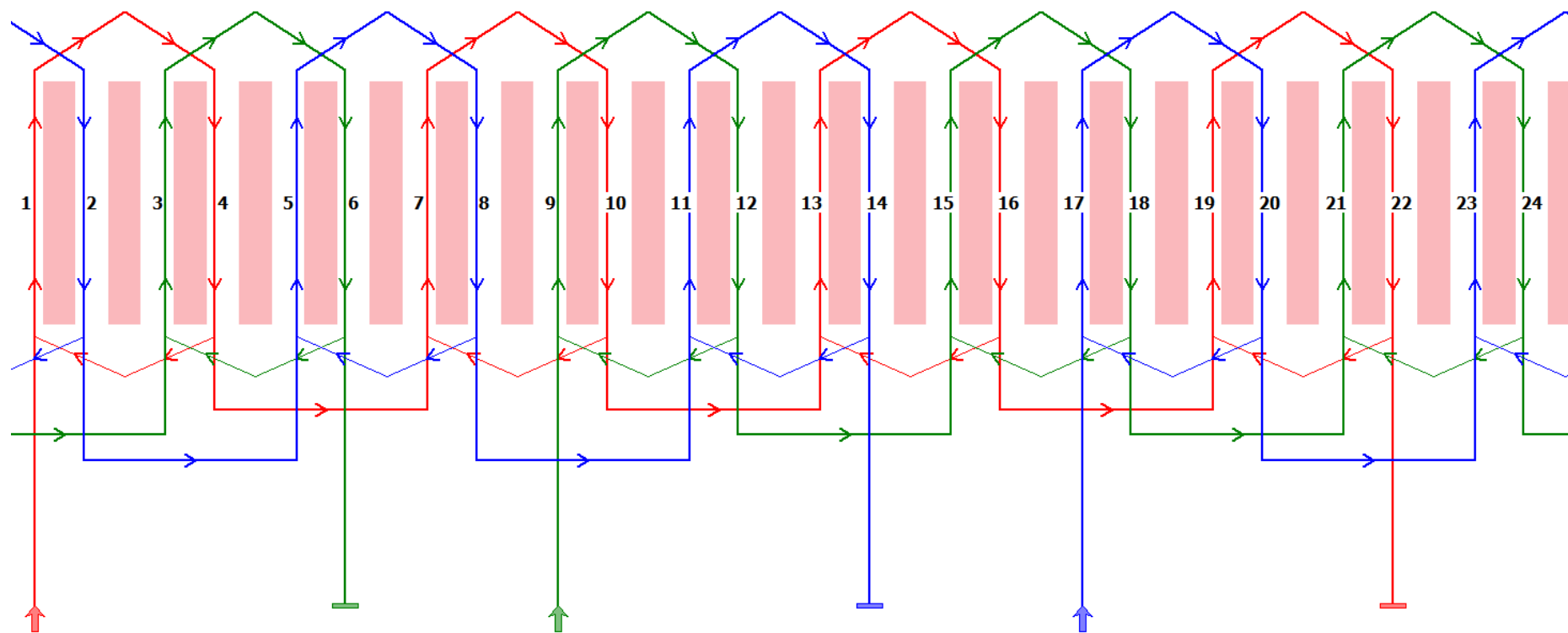
Schematy uzwojenia opracowanego modelu przyjęto do obliczeń według schematów z rysunków 3.2a oraz 3.2b. Jak widać uzwojenie silnika BLPM (zamienna nazwa BLDC) jest uzwojeniem trójfazowym, w konfiguracji gwiazdy, co gwarantuje nam równomierne, symetryczne rozmieszczenie amperozwojów w każdej fazie.



a)

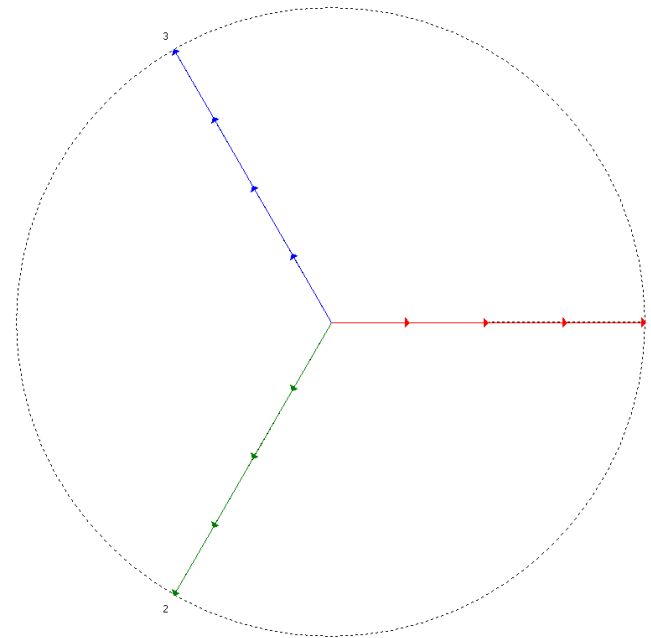


b)



Rys. 3.2. Schemat uzwojenia zaprojektowanego silnika: a) kołowy, b) liniowy.

Taka struktura uzwojenia miała istotne znaczenie na występujący w maszynie, moment zaczepowy oraz siły naciągu elektromagnetycznego decydujące o równomiernej pracy. Musimy pamiętać, iż każdy silnik elektryczny jest przetwornikiem elektromechanicznym, a tym samym pracującym w środowisku sił zarówno elektrycznych jak ich mechanicznych. Równomierne przekształcenie energii elektrycznej w mechaniczną przy minimalnych wibracjach gwarantuje nie tylko stabilną pracę urządzenia, ale i jego niezawodność. Wskazowy wykres uzwojenia oraz powiązany z nim rozkład harmonicznego mechanicznego widzimy na rysunku 3.4.

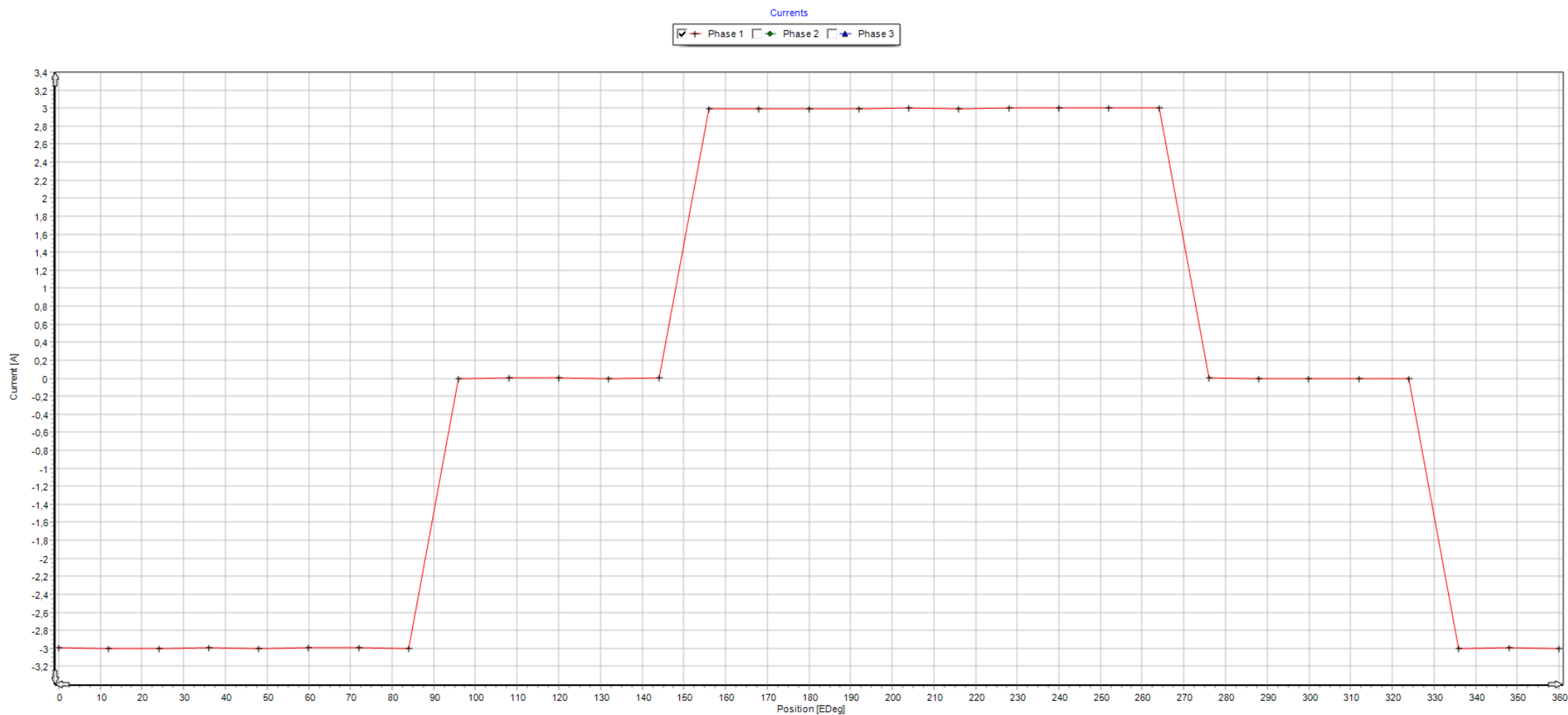


Rys. 3.4. Wykres wskazowy uzwojenia stojana.

3.1.2. Rezultaty analizy modelu elektromagnetycznego

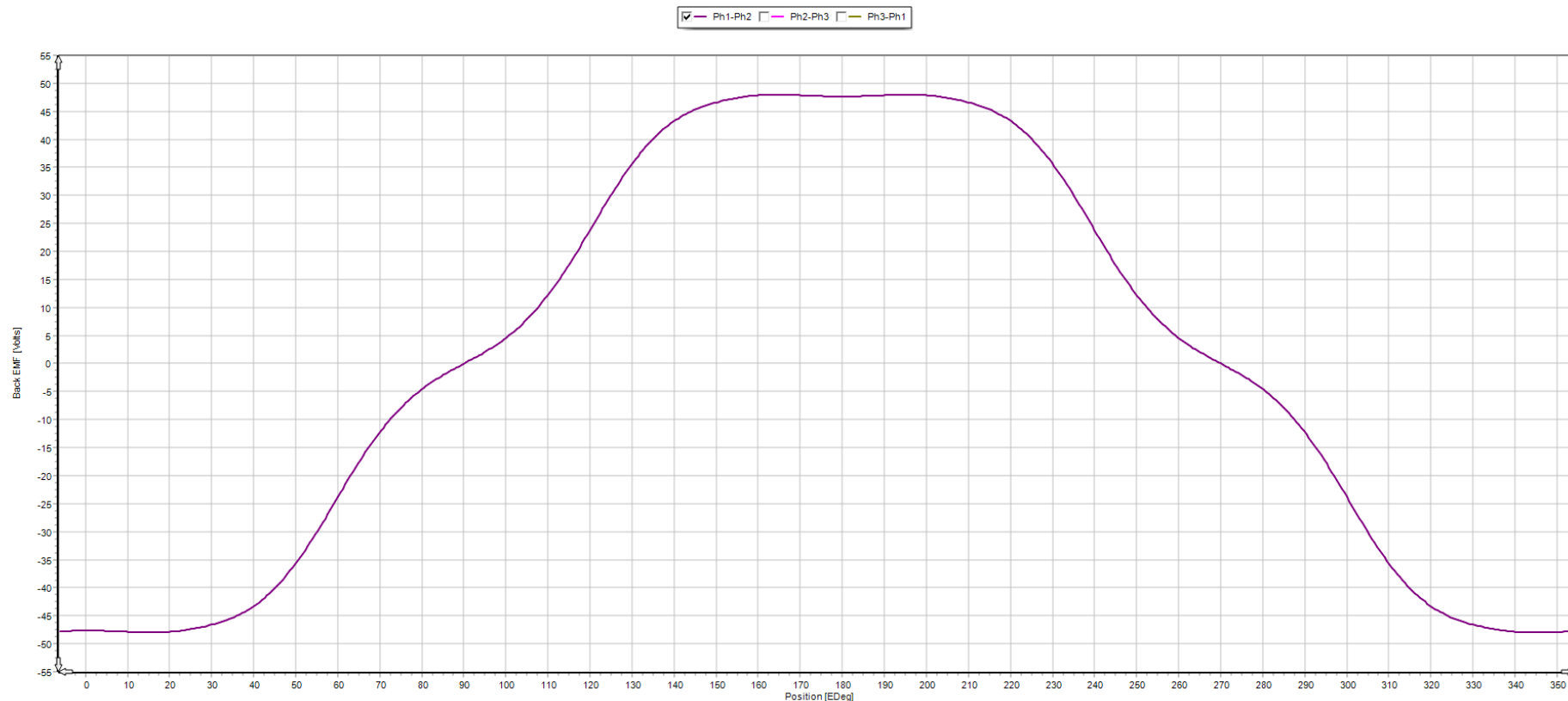
W oparciu o instrumenty jakie udostępniło nam narzędzie do projektowania wykonano symulację dla zbudowanego w programie modelu elektromagnetycznego celem weryfikacji przyjętych na wstępie prac projektowych założeń. W rzeczywistym silniku BLDC zasilanie uzwojeń stojana odbywa się za pomocą elektronicznego komutatora. Jest to skomplikowany układ elektroniczny zawierający zarówno układy analogowe jak i cyfrowe wraz z odpowiednim oprogramowaniem pozwalającym na różnorakie sterowanie, zabezpieczenie silnika w stanach awaryjnych itp.

Obliczenia przeprowadzono dla przebiegu prostokątnego o wartości szczytowej prądu 3A (rysunek 3.5), przy gęstości wartości skutecznej prądu w uzwojeniu na poziomie 7,3A, napięciu międzyfazowemu 400V, prędkości obrotowej $n=1500$ rpm.



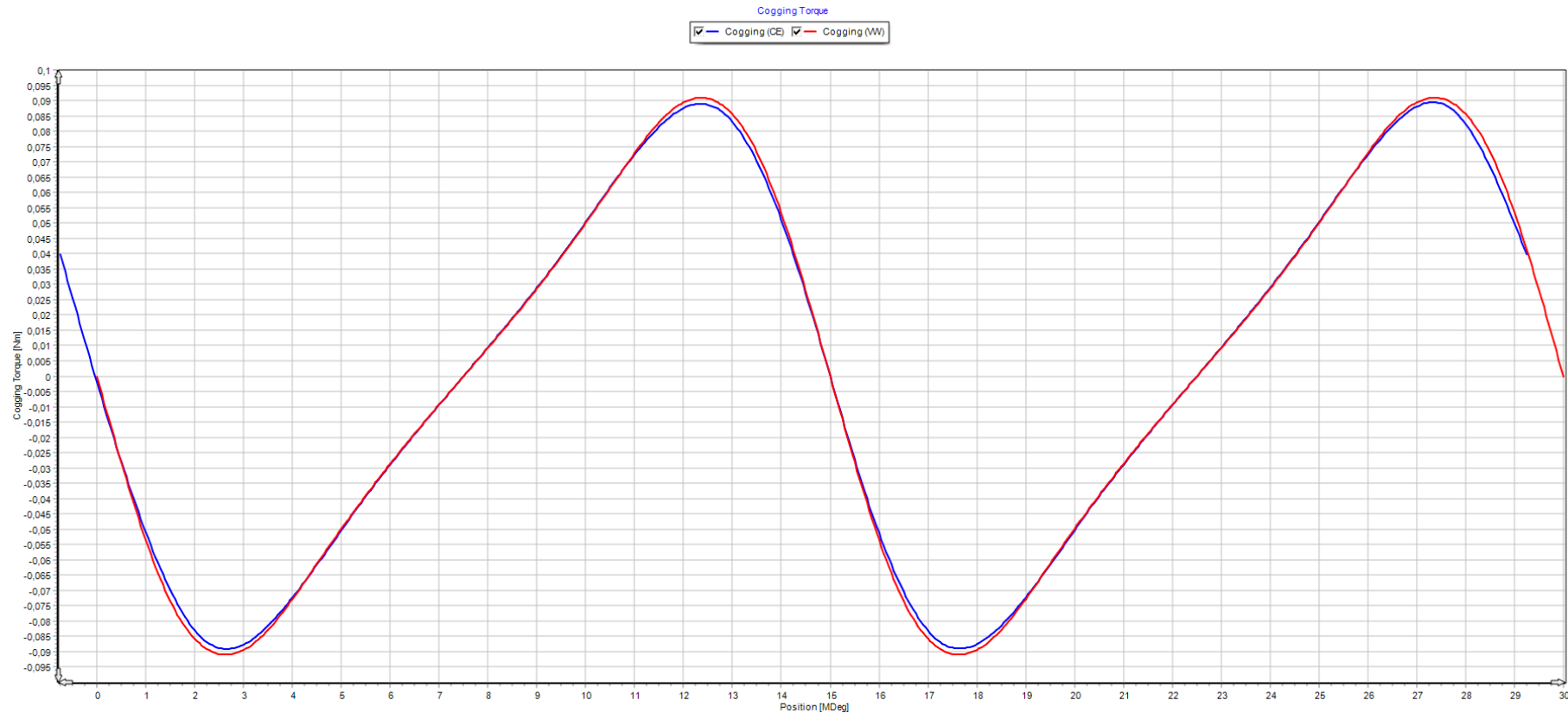
Rys. 3.5. Przebieg prądu w wybranej fazie w funkcji kąta obrotu wirnika.

Jak widać wartość prądu fazowego w symulacji nie przekracza założonej na wstępie, natomiast wartość szczytowa napięcia wstecznego dla pojedynczego uzwojenia jest na poziomie $EMF=50V$, co uznać należy za wynik zadowalający.



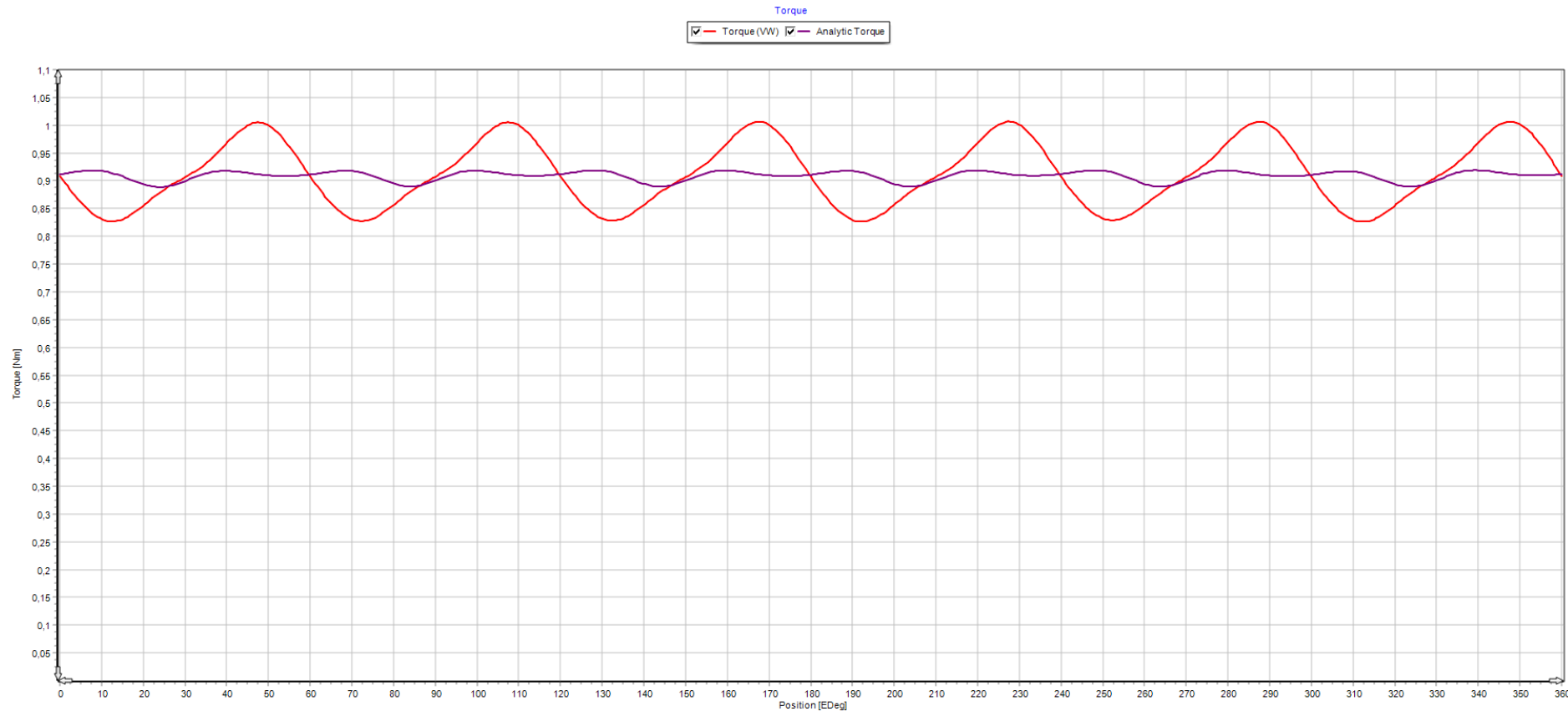
Rys. 3.6. Wartość indukowanej wstecznej siły elektromotorycznej *Back EMF* w funkcji kąta obrotu wirnika.

Zastosowanie ośmiobiegunowego silnika w symetrycznym uzwojeniu wpływa na pulsację i wartość momentu zaczepowego, co widzimy na rysunku 3.8. Jego stosunkowo niewielka wartość pozwoliła założyć, że rzeczywisty egzemplarz silnika cechować będzie duża stabilność.



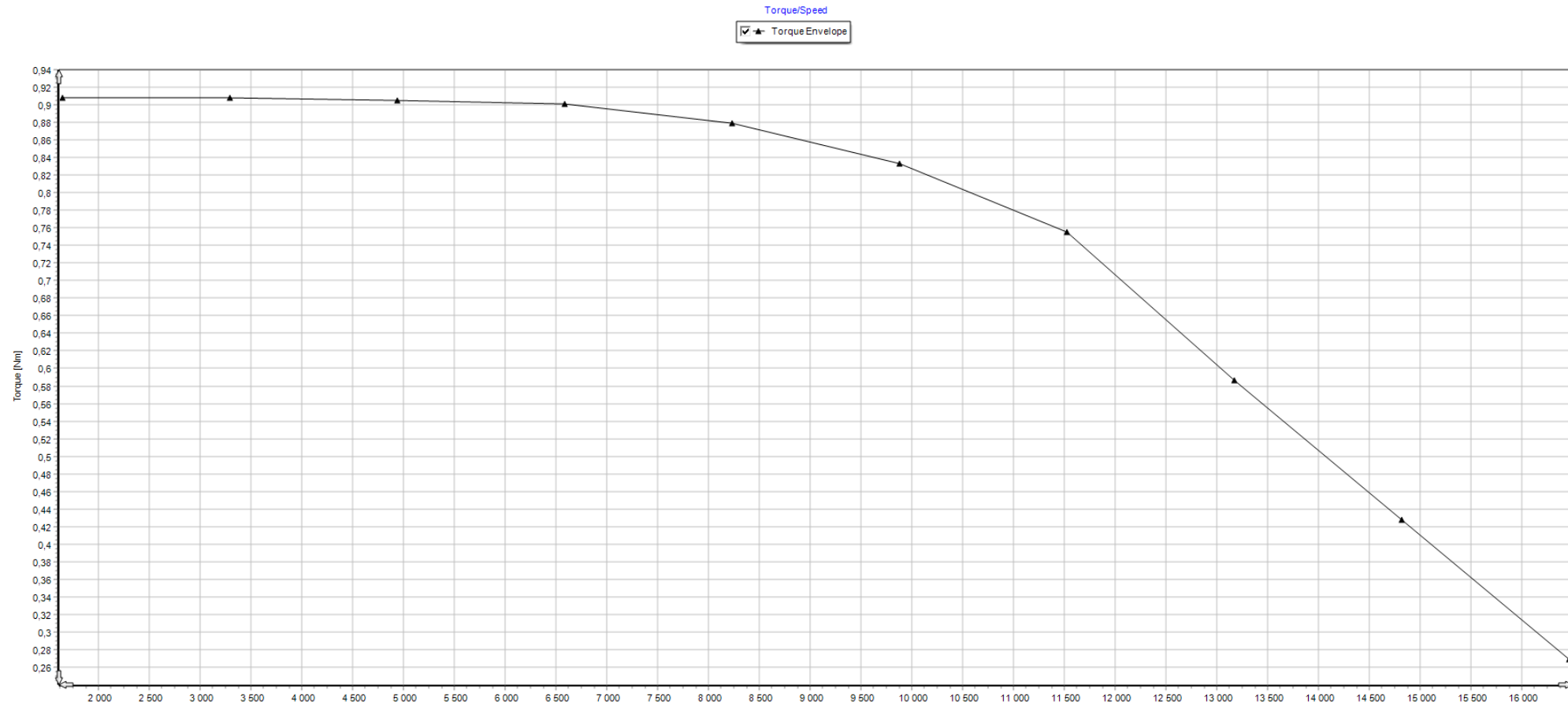
Rys. 3.7. Moment zaczepowy Cogging torque.

Wartość momentu na wale w funkcji położenia wirnika maszyny oscylował wokół założonej wartości 0,9 Nm. Przebieg dla jednego pełnego obrotu ilustruje rysunek 3.8.



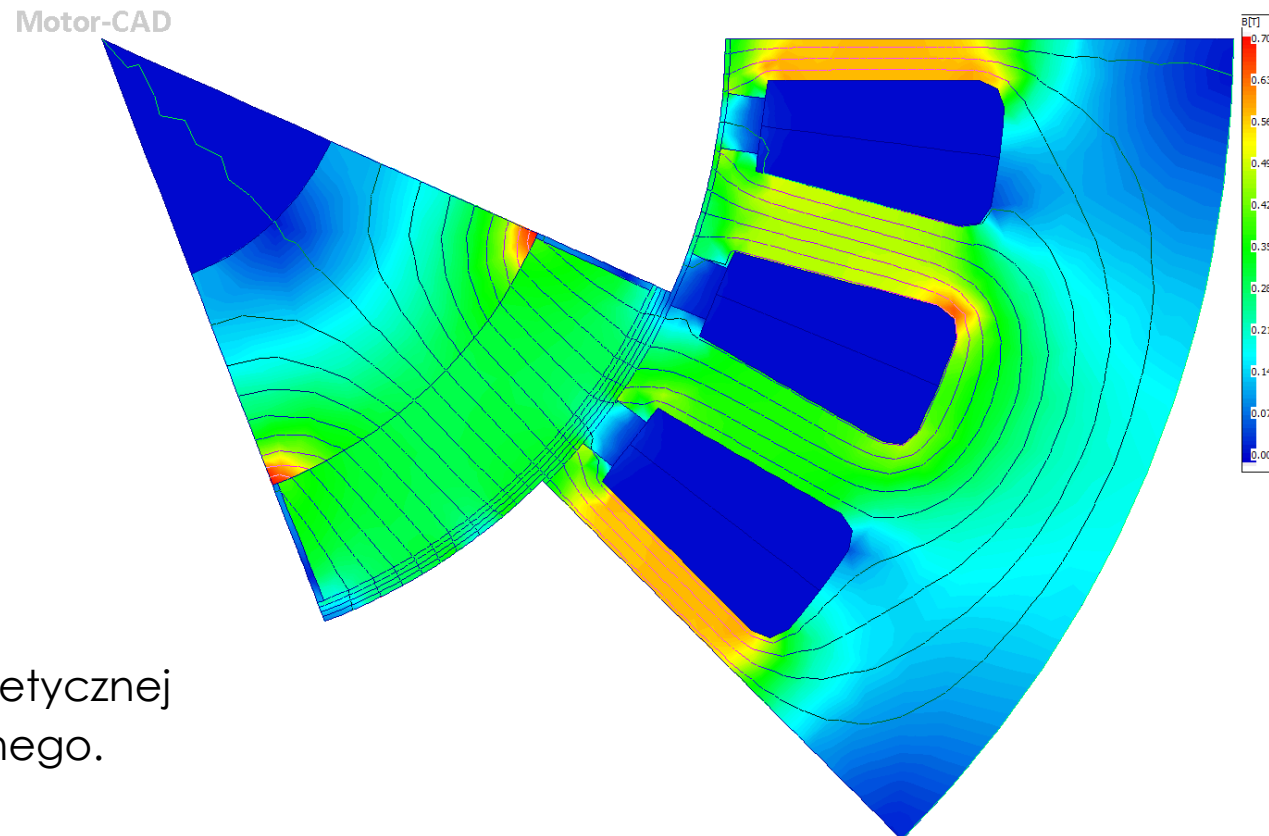
Rys. 3.8. Przebieg momentu na wale w zależności kąta obrotu.

Parametrem wyróżniającym silnik BLPM na tle pozostałych maszyn elektrycznych pracujących w wielorakich napędach jest stałość momentu na wale w funkcji prędkości obrotowej. Zaprojektowany silnik wykazał taką cechę, w znacznie przekraczającym badany zakres, prędkościach obrotowych (rysunek 3.9).



Rys. 3.9. Przebieg momentu znamionowego w funkcji prędkości obrotowej.

Metody polowo obwodowe w jakie zaopatrzone jest zastosowane narzędzie do projektowania, umożliwiło nam w najbardziej dokładny sposób określić rozkład pola magnetycznego w poszczególnych elementach stojana. Wprowadzane zmiany parametrów elektrycznych w rozkładzie uzwojenia, pozwoliło obserwować zmiany, co nie było by możliwe w metodach analitycznych. Rozkład pola magnetycznego oraz linie sił strumienia widzimy na rysunku 3.10. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej w magnetowodzie nie przekraczała $B=0,46T$, z kolei w centralnej części zęba i jarzma stojana wynosiła odpowiednio $B=0,6T$ oraz $B=0,3T$.



Rys. 3.10. Rozkład indukcji magnetycznej oraz linie strumienia magnetycznego.

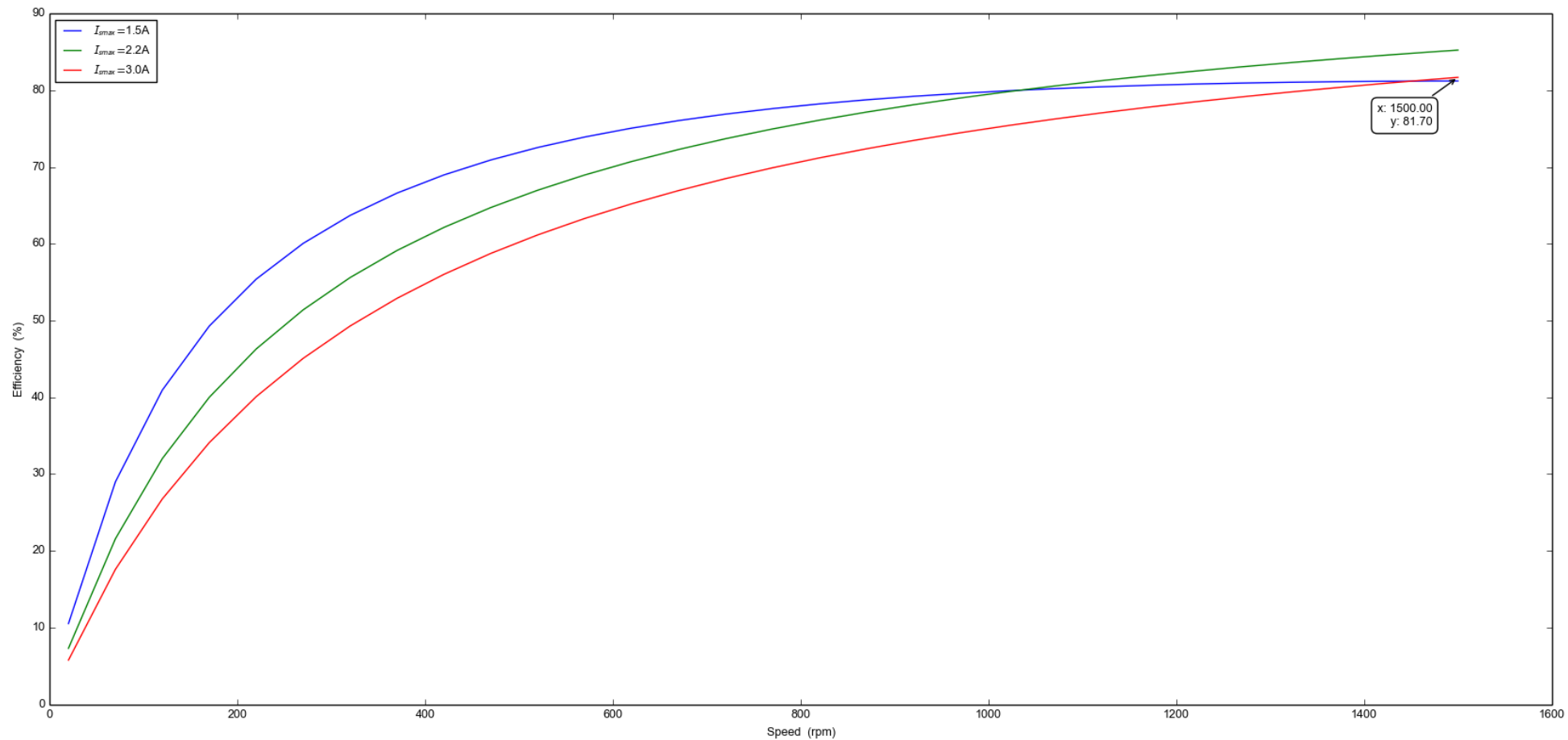
3.2. Model LAB silnika

Motor-CAD LAB jest połączonym zestawem narzędzi do modelowania elektromagnetycznego i termicznego, ułatwiając tym samym modelowanie i optymalizację konstrukcji silnika w całym przewidywanym zakresie roboczym. LAB pozwala projektantom na tworzenie map efektywności, wykreślać charakterystyki momentu obrotowego, prędkości ciągłej i szczytowej, analizować osiągi w różnych cyklach pracy.

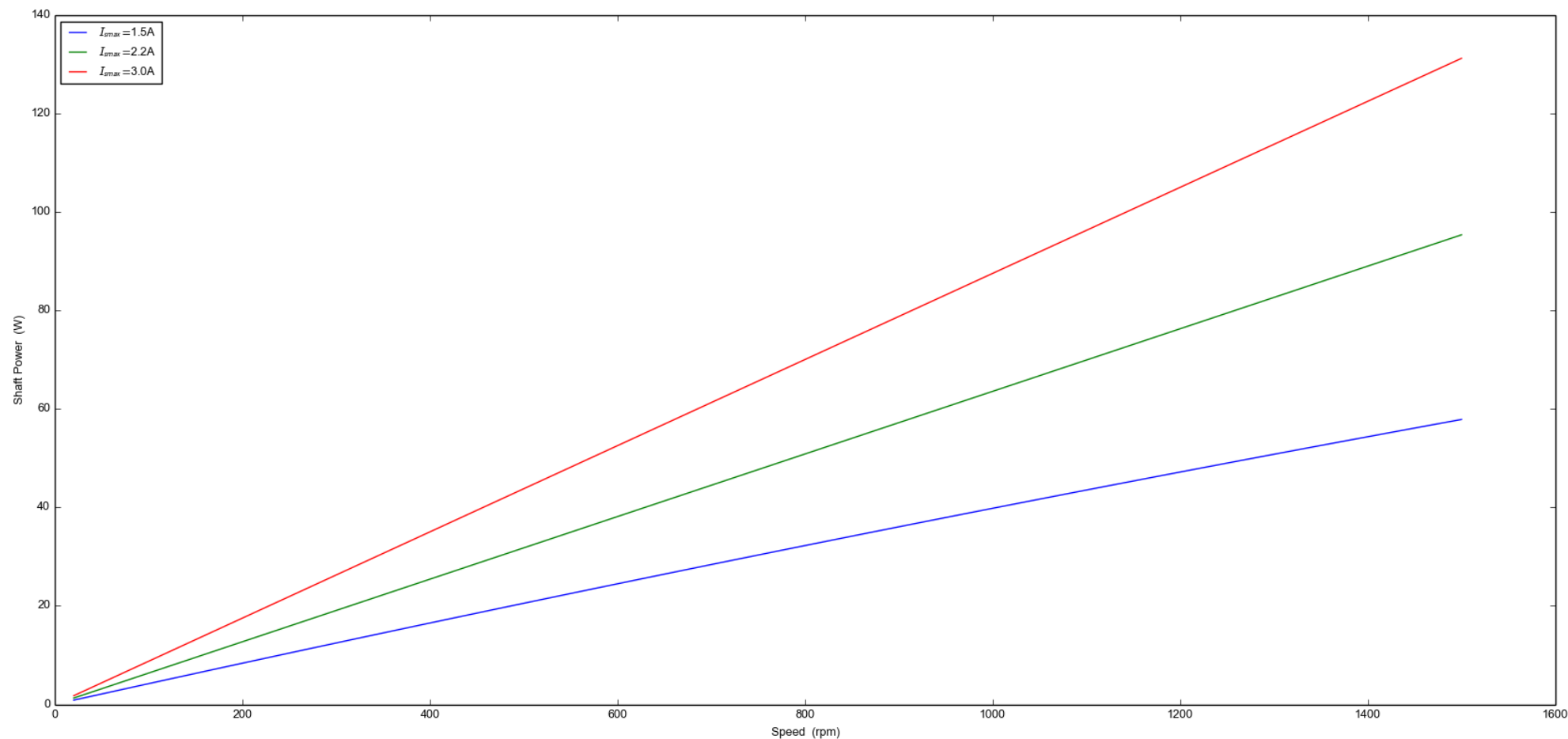
3.2.1. Rezultaty analizy modelu LAB

Aby zaobserwować zmiany podstawowych parametrów omawianego modelu silnika, wykonano analizę porównawczą dla kilku wartości prądu - otrzymane wyniki widoczne są na rysunkach 3.11, 3.12, 3.13. Sprawność silnika BLPM dla prędkości zbliżonych do maksymalnych, nawet dla wartości prądu rzędu 1,5A osiąga wartość 80%, co dla klasycznego silnika było nieosiągalne.

Rys. 3.11. Sprawność projektowanego modelu w funkcji prędkości obrotowej dla trzech wartości prądu.

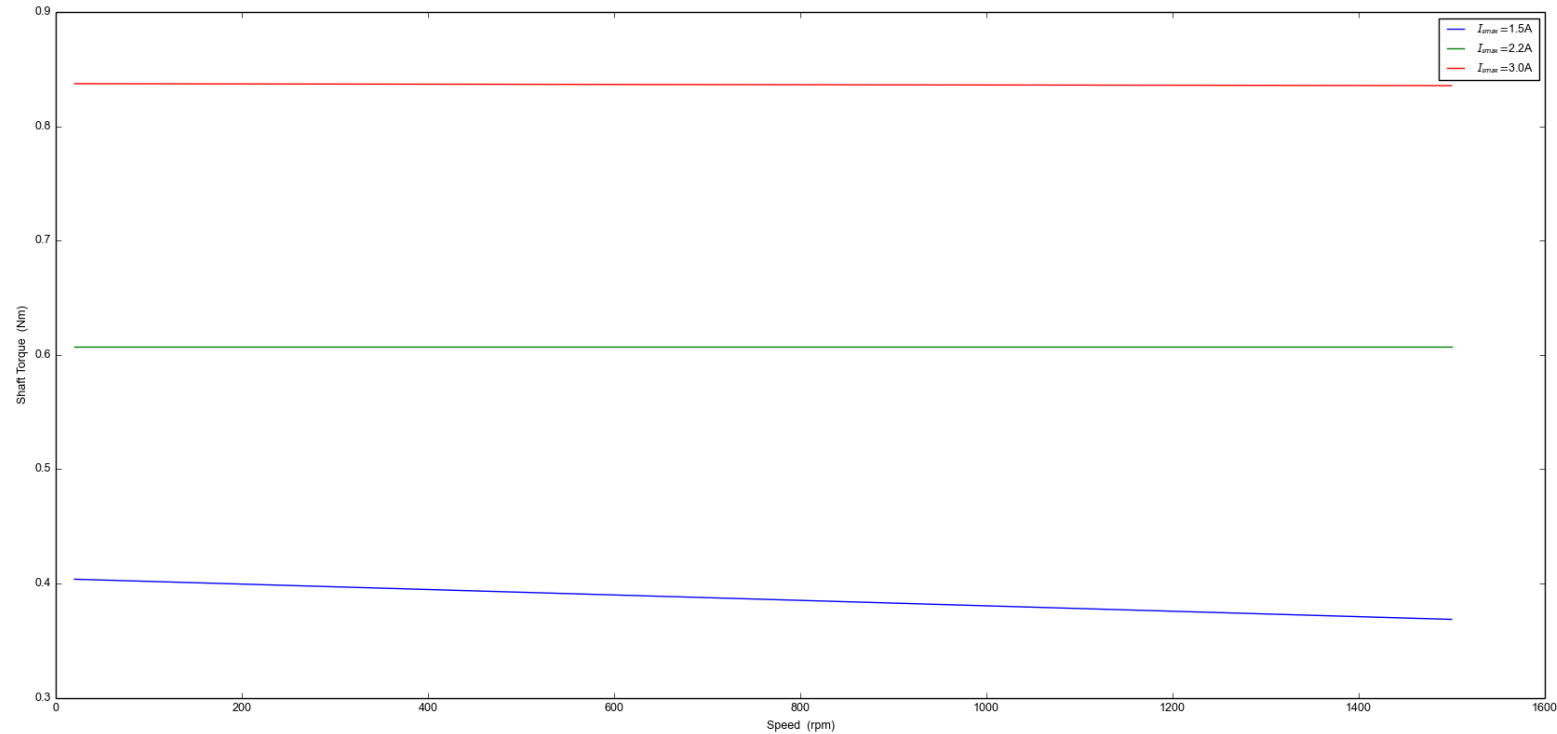


Rys. 3.12. Wartość mocy na wale w funkcji prędkości obrotowej dla trzech wartości prądu.





Rys. 3.13. Wartość momentu na wale w funkcji prędkości obrotowej dla trzech wartości prądu.



Wyznaczono punkt pracy silnika dla prędkości obrotowej $n=1500\text{rpm}$ oraz momentu znamionowego $T=0,85\text{Nm}$. Na uwagę zasługuje fakt, iż całkowite straty w silniku wynoszące $29,41\text{W}$, posiadają tylko dwie składowe: straty w uzwojeniach oraz w rdzeniu (żelazie), natomiast brak jest strat w wirniku o czym wspomniano już we wstępie.

3.3. Model mechaniczny silnika

Moduł Mechanical zawarty w Motor CAD pozwolił na analizę rozkładu naprężeń wirnika w omawianej maszynie elektrycznej. Obliczenia oparte były na założeniach:

- zerowych naprężeń w kierunku osiowym (stan naprężeń płaskich),
- materiałach izotropowych (te same właściwości w kierunku promieniowym i stycznym),
- zerowej termicznej (pod uwagę bierze się tylko naprężenia odśrodkowe),
- braku wstępnego naprężenia wirnika pochodzącego z wału.

3.3.1. Wyniki analizy mechanicznej

Przedstawione poniżej wyniki wykonano dla prędkości obrotowej $n=1500\text{rpm}$. Rysunek 3.14 przedstawia fragment wirnika z siatką niezbędną do wykonania obliczeń. Największe naprężenia występowały na styku tulei i wału silnika i wynosiły $0,09\text{Mpa}$. Wartości średnie oraz maksymalne zestawiono w tabeli 3.1.

Rys. 3.14. Rozkład naprężeń poszczególnych elementów wirnika dla prędkości obrotowej $n=1500\text{rpm}$.

Motor-CAD

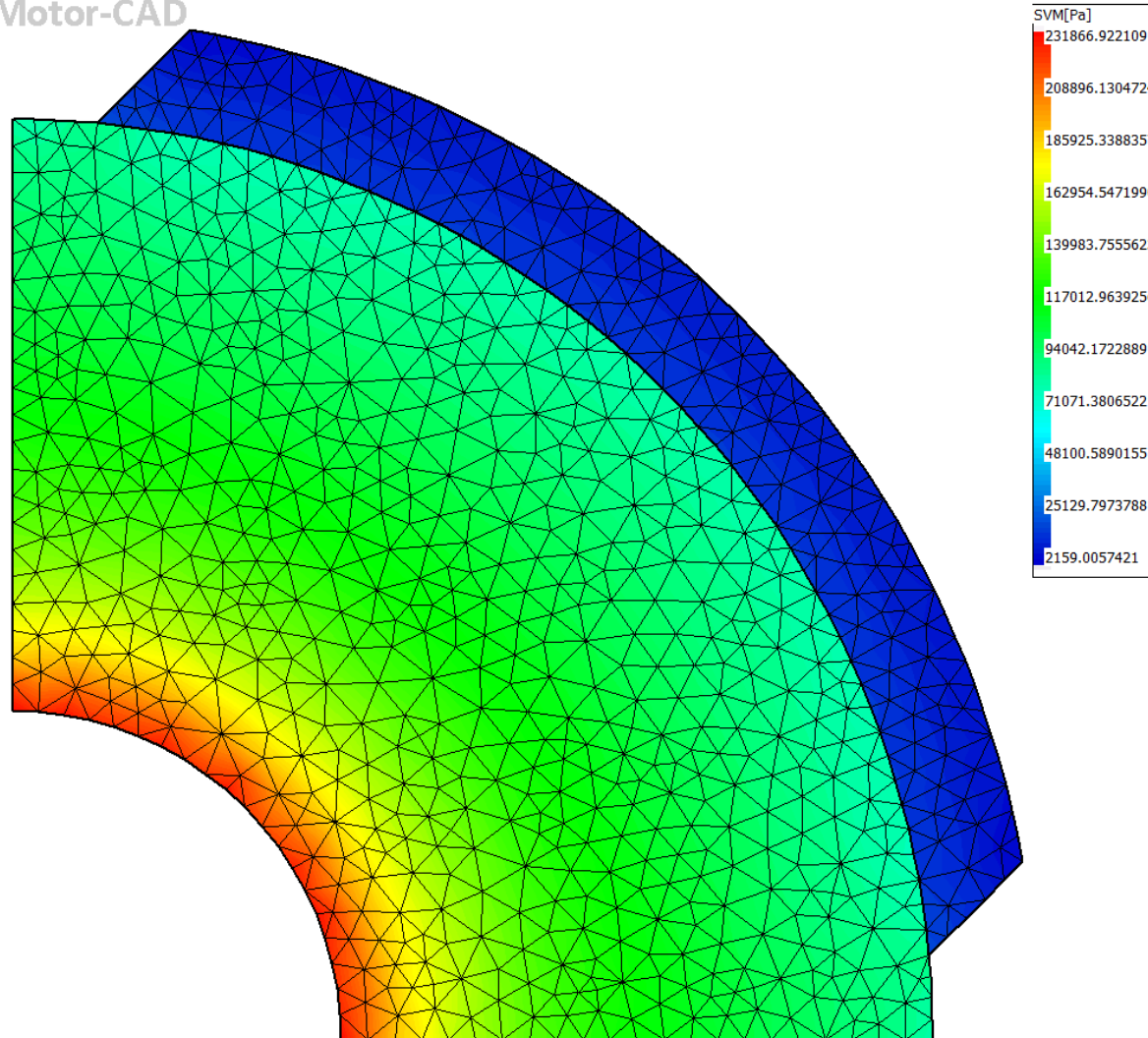


Tabela 3.1. Zestawienie występujących w wirniku naprężeń.

Variable	Value	Units	Variable	Value	Units
Current Shaft Speed RPM	1500	rpm	Rotor Lamination displacement (average)	4,495E-006	mm
-----			Rotor Lamination displacement (max)	4,787E-006	mm
Rotor Lamination Material Yield Stress	3,05E008	Pa			

Rotor Lamination Stress (average)	6,117E004	Pa			
Rotor Lamination Stress (max)	9,52E004	Pa			

Rotor Lamination Yield Stress ratio	0,0003121				
Rotor Lamination Safety Factor	3204				

Rotor Lamination Hoop Stress (inner) [analytical]	5,952E004	Pa			
Rotor Lamination Hoop Stress (outer) [analytical]	2,75E004	Pa			

4. Podsumowanie

Niniejsza publikacja ilustruje współczesny proces projektowania, modelowania i symulacji maszyny elektrycznej z wykorzystaniem nowoczesnego narzędzia jakim bez wątpienia jest Motor-CAD firmy ANSYS. Wykonanie szeregu analiz i rozbudowanych symulacji pozwoliło na weryfikację założonych na etapie koncepcji wymagań, ich korektę i optymalizację elementów, które w myśl zakładanej kompatybilności z istniejącym już silnikiem mogły ulec zmianie. To co należy podkreślić to fakt, iż projektowanie i modelowanie w Motor-CAD pozwoliło dokonać wielu skomplikowanych obliczeń i symulacji na etapie przed prototypowym i pozwoliło na uniknięcie wykonywania często kosztownych i czasochłonnych badań dodatkowych.

Analizując poszczególne etapy badań modelu numerycznego maszyny musimy potwierdzić, iż przyjęte i zamieszczone w rozdziale 2.1 wymagania nowego silnika zostały osiągnięte. Maszyna wykazała się bardzo wysoką sprawnością przekraczającą 80%, natomiast moment znamionowy, jak ilustruje to rysunek 3.8 oraz rysunek 3.13 jest stabilny w całym zakresie prędkości obrotowych.

Struktura uzwojenia równomiernie rozłożonego w 24 żłobkach stojana wraz z maksymalną ilością biegunów dla takiej kształtki stojana (8 biegunów) skutkuje stosunkowo niską wartością indukcji w zębie na poziomie 0,6T, przy przeciętnej wartości w tego typu maszynach wynoszącej 0,8T, co pozwoliło znacznie ograniczyć szkodliwy w silnikach BLPM/BLDC moment zaczepowy do poziomu 0,9Nm.

Istotnym osiągnięciem konstrukcyjnym jest z pewnością model termiczny maszyny elektrycznej. Zarówno statyczny punkt pracy jak i symulacja nagrzewania w ciągu wyznaczonego przedziału czasowego przedstawia mapę temperaturową, która jak ilustrują to schematy i przekroje zawarte w rozdziale 3.3 pozostawia bezpieczny margines pracy (dopuszczalna temperatura uzwojeń w stosowanej klasie izolacji F to 155°C przy maksymalnej w modelu poniżej 80°C). W przypadku niekontrolowanych przeciążeń rzeczywistego silnika, gwarantuje to niezawodną długotrwałą pracę i ponadto potwierdza brak konieczności stosowania przewietrznika na wale silnika, a wykorzystywana w tym przypadku konwekcja naturalna jest w zupełności wystarczająca, co przekłada się dodatkowo na niski poziom hałasu i szumu generowanego przez wyrób końcowy.