

Roman Miksiewicz, Arkadiusz Sikora
Politechnika Śląska, Gliwice

OBLICZENIA I POMIARY PRZEBIEGÓW PRĄDÓW I NAPIĘĆ W ALTERNATORZE KŁOWYM W STANIE OBCIĄŻENIA

CALCULATIONS AND MEASUREMENTS OF VOLTAGE AND CURRENT WAVEFORMS IN CLAW POLE ALTERNATOR UNDER LOAD

Abstract: The paper presents the results of computations and measurements of the waveforms of currents and voltages of the claw pole alternator at the constant speed in the steady state. The computations and measurement were made for the alternator resistance load. The calculations were carried out with use of the finite element method in the transient module of program Maxwell 3D. The computation results of the waveforms were compared with the measurement results of the claw pole alternator.

1. Wstęp

Alternator samochodowy przeznaczony jest do pracy ciągłej pod obciążeniem. Parametry konstrukcyjne maszyny są dobierane w taki sposób aby zapewnić optymalne wykorzystanie maszyny w tym stanie pracy. Podstawową charakterystyką informującą użytkownika o właściwościach alternatora jest charakterystyka obciążeniowa. Dzięki niej można określić wydajność prądową maszyny oraz możliwe maksymalne obciążenie, jakie może zostać dołączone do zacisków wyjściowych. Charakterystyka obciążeniowa służy również do porównania ze sobą różnych konstrukcji alternatorów. Obliczeniowe wyznaczenie charakterystyki obciążenia oraz przebiegów prądów i napięć w uzwojeniach alternatora już na etapie projektowania ma więc ogromne znaczenie. Dzięki temu można wyeliminować długotrwały proces przygotowania prototypu i przeprowadzania badań laboratoryjnych. Można również bardzo łatwo badać wpływ wprowadzanych zmian w geometrii stojana i wirnika maszyny bez ponoszenia dodatkowych nakładów finansowych na budowę prototypu. W celu zoptymalizowania konstrukcji alternatora i sprawdzenia wykorzystania rdzeni magnetycznych już na etapie projektowania wykorzystuje się metodę elementów skończonych. Ze względu na strukturę obwodu magnetycznego można tylko wykonywać obliczenia dla modelu trójwymiarowego. Problemem jaki pojawia się w obliczeniach rozkładów pól elektromagnetycznych jest wiarygodność otrzymanych wyników. Ponieważ pomiary pola magnetycznego wewnątrz alternatora są praktycznie niemożliwe, trudno potwierdzić poprawność otrzymanych wyników

rozkładów pola. Przebiegi czasowe napięć i prądów zależą od rozkładu pola elektromagnetycznego w maszynie. W związku z tym tylko na podstawie porównania obliczonych i zmierzonych przebiegów prądów i napięć można potwierdzić poprawność uzyskanych wyników obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego. W artykule przedstawiono porównanie wyników obliczeń i pomiarów przebiegów napięć i prądów w stanie obciążenia alternatora. Obliczenia zostały przeprowadzone metodą elementów skończonych w module „Transient” programu Maxwell 3D. Pomiary przebiegów napięć i prądów alternatora kłowego wykonano na Uniwersytecie Technicznym w Brnie (BUT), na przystosowanym do tego celu stanowisku badawczym [5].



Rys. 1. Obwód magnetyczny alternatora

Przedmiotem obliczeń i badań był alternator kłowy (rys.1) o danych przedstawionych w tabeli 1.

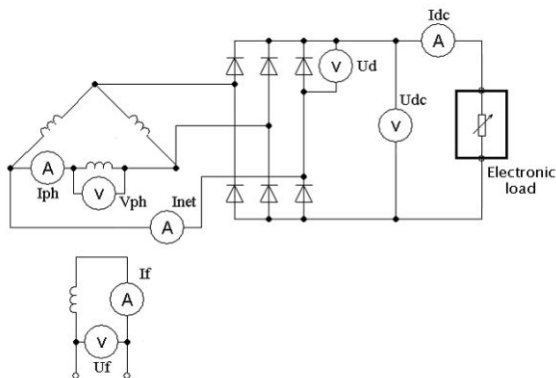
Tab.1. Dane znamionowe alternatora

Napięcie znamionowe	14 V
Prąd znamionowy	140 A
Prąd wzbudzenia	5,4 A
Prędkość obrotowa	12000 obr/min

2. Pomiary alternatora

Alternator samochodowy jest specyficznym obiektem badań. Charakterystyka obciążenia $I_{out}(n)$ po przekroczeniu minimalnej prędkości, dla której możliwe jest obciążenie prądnicy, cechuje się dużą stromością narastania i przy stosunkowo niedużych zmianach prędkości obrotowej (1500÷2000 obr/min), prąd obciążenia zmienia się w granicach 0 ÷ I_n . Prąd znamionowy jest uzyskiwany już przy stosunkowo niskich prędkościach obrotowych, około 3000 obr/min. Natomiast typowy zakres pracy alternatora mieści się w granicach 2000 ÷ 10000 obr/min. Przy tego typu charakterystyce problemem staje się zbudowanie odpowiedniego obciążenia dla alternatora. Rezystor obciążający alternator powinien charakteryzować się możliwością płynnej regulacji w szerokim przedziale prędkości obrotowej rozpraszając moc rzędu kilku kW. Ponadto układ badawczy powinien zabezpieczyć układ prostownika alternatora przed ewentualnymi przepięciami po gwałtownej zmianie obciążenia. Na stanowisku badawczym, jako obciążenie zastosowano specjalny układ elektroniczny, który steruje rezystorami dużej mocy.

Pomiary przebiegów napięć i prądów przeprowadzono w układzie przedstawionym na rys. 2.



Rys. 2. Układ pomiarowy

W odróżnieniu od rzeczywistego układu w pojeździe samochodowym, przedstawione stano-

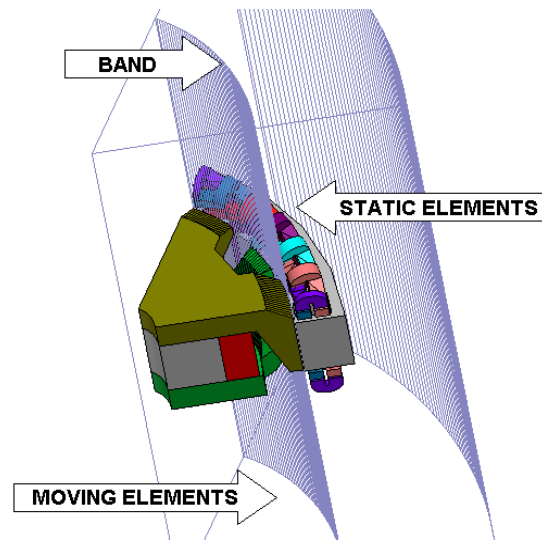
wisko pomiarowe nie zawiera układu regulacji prądu wzbudzenia oraz akumulatora podłączonego równolegle do obciążenia rezystancyjnego układu prostownikowego. Celem przeprowadzonych badań i symulacji było określenie właściwości alternatora w tych samych warunkach obciążenia. Aby można uzyskać zbliżone warunki pomiarów i symulacji, uzwojenie wzbudzenia dołączono do zewnętrznego źródła napięcia celem zapewnienia lepszej kontroli nad wartością prądu wzbudzenia oraz pozostałych wielkości wyjściowych alternatora (prądu i napięcia na obciążeniu).

Podczas pomiarów wszystkie przebiegi czasowe zaznaczone na rys. 2 rejestrowano za pomocą oscyloskopów cyfrowych.

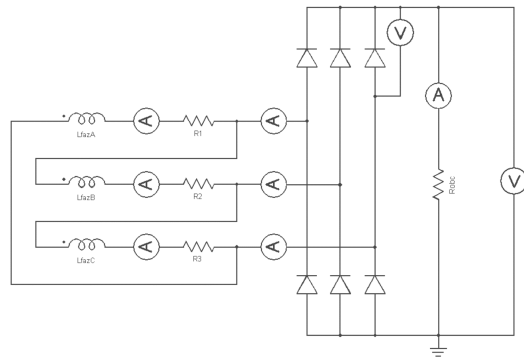
Pomiary przeprowadzono dla kilku wybranych wartości prędkości obrotowej. Przebiegi zarejestrowano przy stałej prędkości obrotowej i prądzie wzbudzenia tak dobranym aby uzyskać na zaciskach wyjściowych alternatora wartość średnią napięcia wyprostowanego równą 13.5 V.

3. Model obliczeniowy alternatora

Obliczenia przebiegów w stanie obciążenia przeprowadzono dla modelu alternatora przedstawionym na rys. 3. Wykorzystany do obliczeń model posiada w stojanie uzwojenie faliste dwuwarstwowe, które zostało połączone z prostownikiem w module Maxwell Circuit Editor (Schematic Capture – rys.4). Uzwojenia stojana zostały połączone z prostownikiem, aby jak naj-



Rys. 3. Model obliczeniowy alternatora



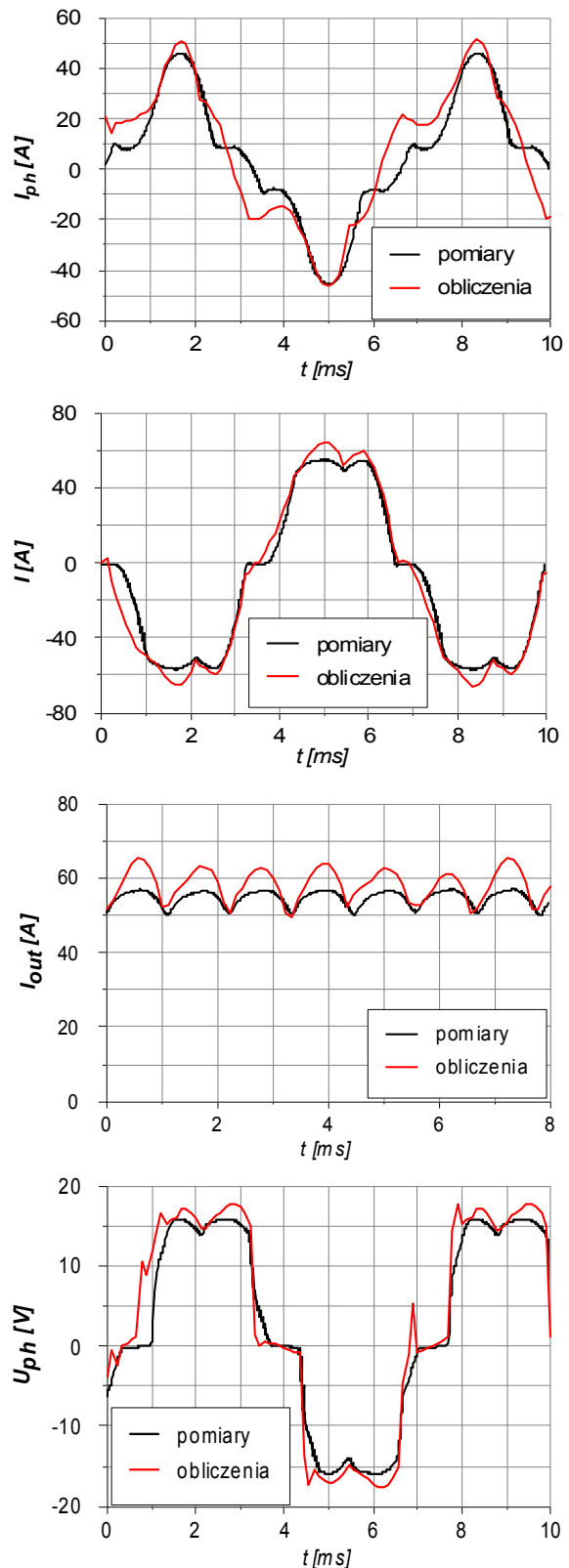
Rys. 4. Schemat połączeń w module Circuit Editor programu Maxwell

dokładniej odwzorować rzeczywiste warunki pracy alternatora w trakcie pomiarów.

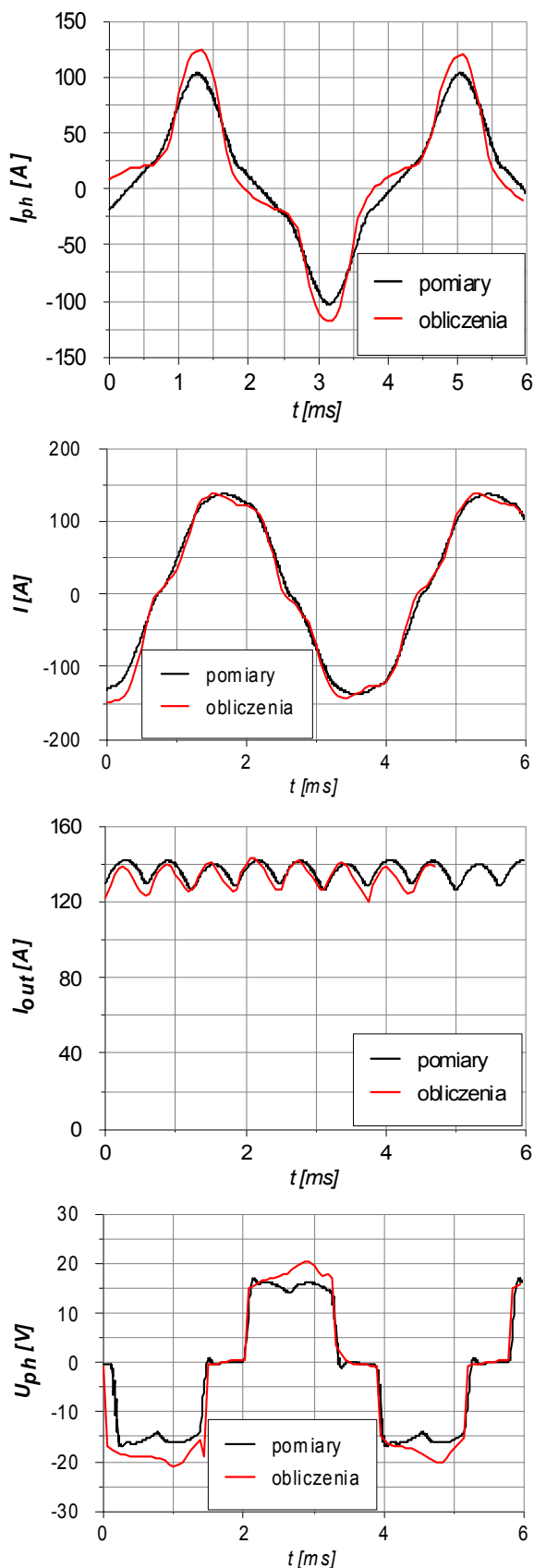
W modelu obliczeniowym jako obciążenie prostownika zastosowano rezystor o takiej samej wartości jak podczas pomiarów. Przyjęto stałe wartości prędkości obrotowej wirnika alternatora. W prezentowanym modelu obliczeniowym utworzono siatkę 78 tys. elementów skończonych. Krok czasowy obliczeń dobrano w taki sposób, aby dla zadanej prędkości obrotowej przesunięcie wirnika wynosiło 1° kątowny. W trakcie symulacji, oprócz rozkładu pola elektromagnetycznego w wybranych chwilach czasu, obliczono przebiegi czasowe prądów fazowych, przewodowych oraz prądu na wyjściu prostownika. Ponadto obliczono napięcie fazowe uzwojenia, spadek napięcia na diodach oraz napięcie wyjściowe prostownika.

4. Porównanie wyników pomiarów z obliczeniami MES

Obliczenia przebiegów napięć i prądów zostały przeprowadzone przy założeniu stałej prędkości obrotowej wirnika alternatora. Przebiegi te obliczono dla kilku wybranych wartości prędkości obrotowych. Przykładowe wyniki obliczeń przebiegów czasowych prądów fazowych $I_{ph}(t)$, prądów przewodowych $I(t)$, prądu na wyjściu alternatora $I_{out}(t)$ oraz napięcia fazowego $U_{ph}(t)$, dla dwóch prędkości obrotowych, przedstawiono na rys 5 i 6.

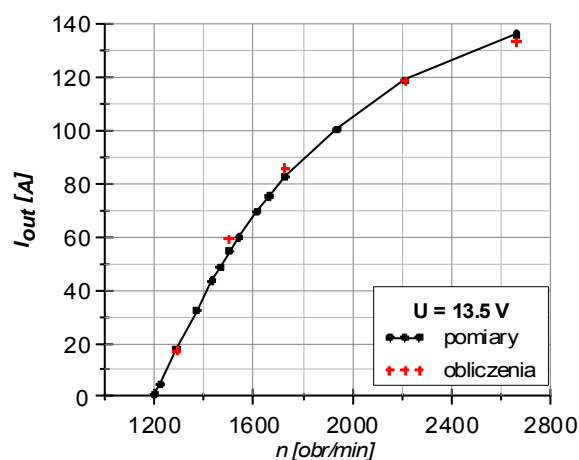


Rys. 5. Porównanie przebiegów prądów i napięć dla prędkości 1500 obr/min



Rys. 6. Porównanie przebiegów prądów i napięć dla prędkości 2662 obr/min

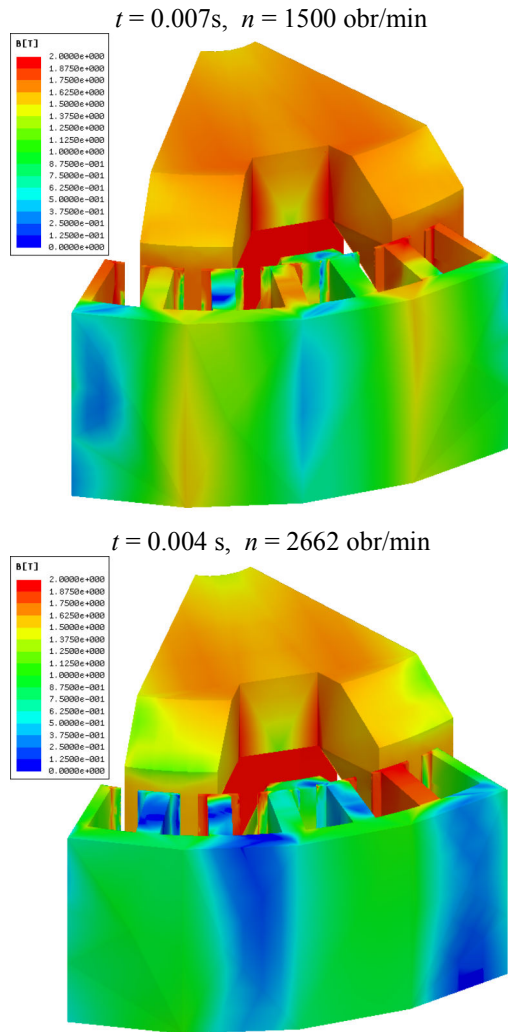
Na podstawie otrzymanych przebiegów czasowych prądu obciążenia prostownika można wyznaczyć charakterystykę wyjściową alternatora. Wyznaczając wartość średnią z przebiegu prądu wyjściowego dla poszczególnych wartości prędkości obrotowej otrzymuje się punkty charakterystyki obciążeniowej (rys. 7). Dla porównania z wynikami pomiarów na charakterystyce zaznaczono punkty dla obliczonych prędkości obrotowych. Przedstawione charakterystyki wskazują na bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów wartości średnich napięć i prądów.



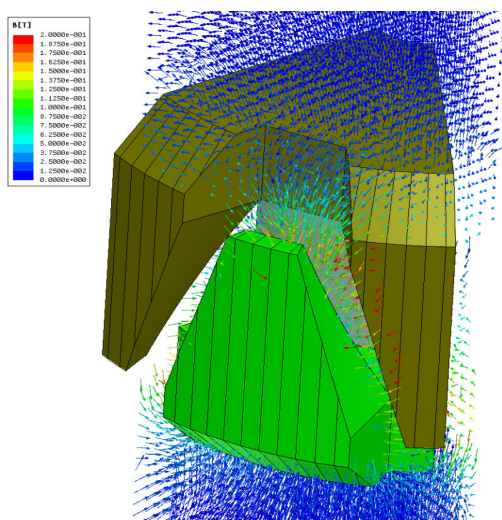
Rys. 7. Pomiarowa i obliczeniowa charakterystyka obciążenia

5. Rozkład pola elektromagnetycznego

Ponieważ wyniki obliczeń i pomiarów przebiegów prądów i napięć w alternatorze kłowym są zbliżone do siebie dlatego można założyć, że rozkład pola elektromagnetycznego jest również zbliżony do rzeczywistego. Przykładowe wyniki rozkładu modułu indukcji magnetycznej w rdzeniu stojana i wirnika alternatora kłowego w stanie obciążenia dla tych samych dwóch prędkości obrotowych, jak przy pomiarach napięć i prądów, przedstawiono na rys. 8. Na rys 9 i rys 10 dla prędkości 1500 obr/min, przedstawiono rozkłady wektora indukcji, które pozwalają na ocenę wartości i kierunku pola indukcji również poza obwodem magnetycznym. Przedstawione wyniki obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego w maszynie mogą służyć do oceny stopnia wykorzystania i optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego. W dobie współczesnej miniaturyzacji i redukcji kosztów związanych z wykorzystaniem materiałów tego typu, prace już na etapie projektowania dają wymierne efekty finansowe.



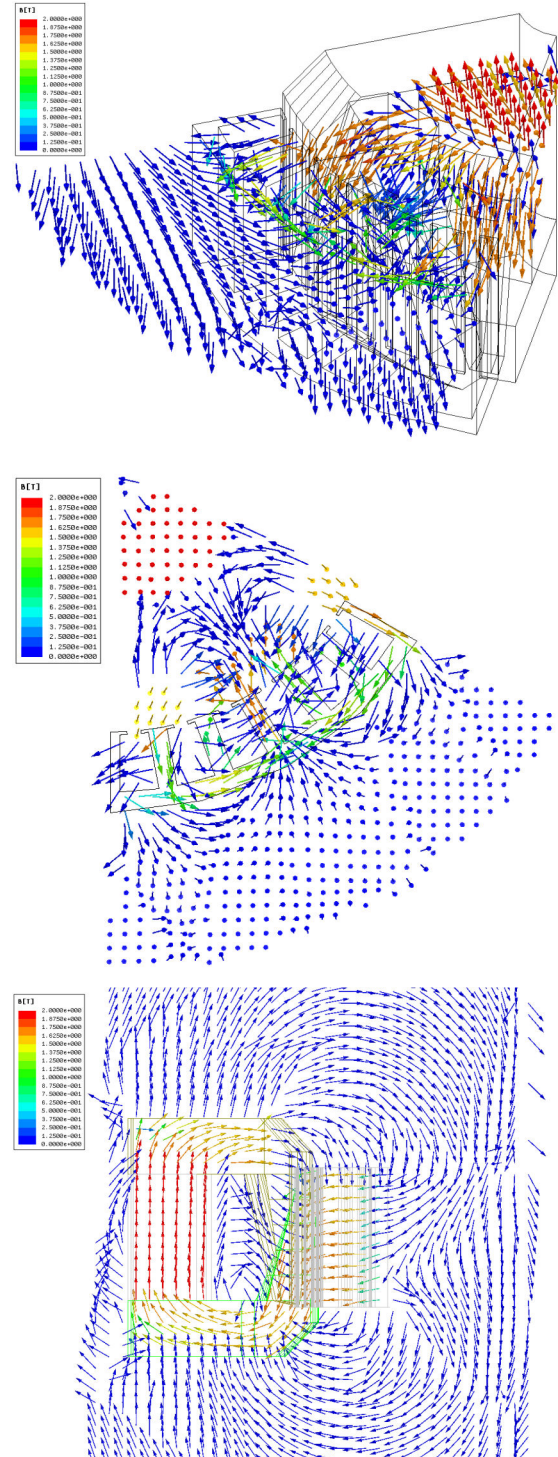
Rys. 8. Rozkłady modułu indukcji magnetycznej dla dwóch prędkości obrotowych



Rys. 9. Rozkłady wektora indukcji magnetycznej w otoczeniu kłków wirnika ($n=1500\text{ obr/min}$)

Wyniki obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego mogą również być wykorzystywane w

pracach związanych ze zmniejszeniem pola rozproszenia. To zagadnienie jest obecnie również ważne, ponieważ w produkowanych typowych konstrukcjach alternatora strumień rozproszenia stanowi aż 35÷45% całkowitego strumienia.



Rys. 10. Rozkłady wektorów indukcji magnetycznej dla prędkości 1500 obr/min

6. Wnioski

Przedstawione w artykule porównanie wskazuje na zadawalającą zbieżność wyników obliczeń i pomiarów przebiegów napięć i prądów w alternatorze kłowym. Największe różnice występują w przebiegach prądów i napięć fazowych. Jedną z przyczyn występujących różnic może być nieuwzględnienie wpływu prądów wirowych indukowanych w pakiecie stojana na otrzymane wyniki. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują na konieczność przeprowadzenia dalszych badań i analiz. Badania te powinny się koncentrować na:

- zbadaniu wpływu gęstości siatki elementów skończonych w modelu na powtarzalność i dokładność otrzymanych wyników,
- analizie wpływu prądów wirowych indukowanych w pakiecie blach stojana na wyniki obliczeń przebiegów napięć i prądów fazowych,
- wyznaczeniu strat mocy w uzwojeniach i rdzeniu,
- określeniu rozkładów przyrostów temperatur w maszynie.

Obliczenia polowo – obwodowe urządzeń 3 wymiarowych są czasochłonne. Zwiększenie gęstości siatki elementów skończonych powoduje wykładnicze zwiększenie czasu obliczeń. Obliczenia uwzględniające wpływ prądów wirowych w jeszcze większym stopniu powodują wydłużenie czasu obliczeń i wymagają dużej pamięci operacyjnej komputera. W konsekwencji prowadzenie długotrwałych wariantowych badań w tym przypadku jest na komputerach klasy PC na obecnym etapie praktycznie niemożliwe.

7. Literatura

- [1]. Henneberger G., Küppers S.: *Field calculation and dynamic simulation of a claw-pole alternator*. Electrical Machines and Drives, 11-13 September 1995, Conference Publication No. 412, IEE 1995.
- [2]. Knorr B., Devarajan D., Lin D., Zhou P., Stanton S.: *Application of Multi-level Multi-domain Modeling to a Claw-pole Alternator*. Society of Automotive Engineers, inc. 2004-01-0758.
- [3]. Kudła J., Sikora A.: *Metodyka wyznaczenia chwilowych strat mocy w litych biegunach wirnika alternatora kłowego*. XLIII International Symposium on Electrical Machines, SME'2007, Poznań, Poland, 2-5 July 2007, s. 171-174.
- [4]. Kudła J., Sikora A.: *Obliczenia polowo – obwodowe przebiegów i charakterystyk alternatora kłowego w stanie zwarcia i w stanie obciążenia*. Przegląd Elektrotechniczny nr. 11 2006, s. 72-75.

[5]. Miksiewicz R., Sikora A., Hajek V., Vitek O.: *Results of 3D field calculations and measurements of claw pole alternators*. International Conference of Low Voltage Electrical Machines, Brno-Slapanice November 2008.

[6]. Zhou P., Fu W. N., Lin D., Stanton S., Cendes Z. J.: *Numerical modeling of magnetic devices*. IEEE Transaction on Magnetics, vol 40, July 2004, pp. 1803-1809

Acknowledgements

The authors wish to thank **Ansoft Corp.** for permission to use gratuitously the program Maxwell 3D for their investigations. The authors also wish to express their appreciation for the considerable help given them by **Mr. Achim Rinortner** and **Oliver Koepfel**, the representatives of **Ansoft Corp.**

Autorzy

Roman Miksiewicz
 Arkadiusz Sikora
 Politechnika Śląska, Gliwice
 Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
 ul. Akademicka 10a
 roman.miksiewicz@polsl.pl