

Mieczysław DZIUBIŃSKI*
Artur DROZD*
Ewa SIEMIONEK*
Marek ADAMIEC*
Krzysztof TOBOREK*

SYMULACJA USZKODZEŃ ROZRUSZNIKA SAMOCHODOWEGO

Tematyka artykułu dotyczy obszaru badań związanych z nowo opracowaną metodą diagnostyki rozrusznika samochodowego z wykorzystaniem analizy charakterystyk mocy rozrusznika i rozkładu indukcji magnetycznej. Nowością w pracy jest wykorzystanie oprogramowania QuickField do analizy rozptyłu strumienia i rozkładu indukcji magnetycznej oraz analizy uszkodzeń w postaci przerwy i zwarcia wirnika rozrusznika samochodowego. Weryfikację otrzymanych wyników przeprowadzono na obiekcie rzeczywistym poprzez rejestrację rozkładu indukcji magnetycznej za pomocą czujnika Halla umieszczonego w szczelinie przyjarzmowej rozrusznika. Przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie wzorców diagnostycznych dla wybranych uszkodzeń rozruszników z zastosowaniem rejestracji komputerowej.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza pola magnetycznego, uszkodzenia rozrusznika, Quick-Field

1. WPROWADZENIE

Obecnie stosowane w motoryzacji napędy hybrydowe wykorzystują silnik elektryczny oraz silnik spalinowy i stanowią około 1% pojazdów poruszających się po drogach. Rozruch silnika spalinowego w samochodach konwencjonalnych następuje przez układ rozruchowy. Rozrusznik jest głównym elementem układu rozruchowego, przetwarzając pobraną energię elektryczną z akumulatora w energię mechaniczną dostarczaną do wału korbowego silnika [7, 11].

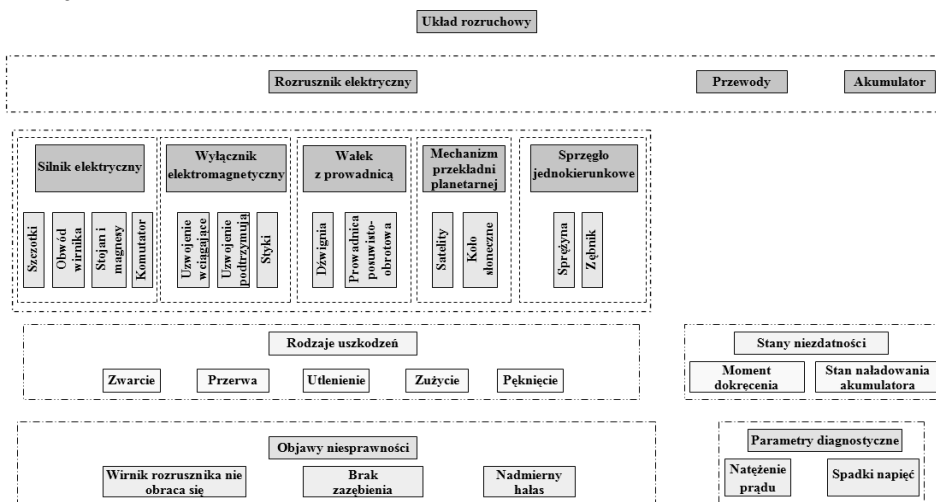
Uszkodzenia rozruszników można podzielić na uszkodzenia elektryczne i mechaniczne, które nie są monitorowane w trakcie eksploatacji samochodu. Istotne jest więc zdiagnozowanie i ustalenie uszkodzeń [1, 2, 10].

Podczas eksploatacji pojazdu powinna być prowadzona w sposób ciągły diagnostyka funkcjonalna. Dotychczas dla obwodu rozruchowego prowadzono

* Politechnika Lubelska.

obserwację stanu sprawny-niesprawny, natomiast stan przejściowy i graniczny nie jest monitorowany przez komputer pokładowy lub MIL (ang. *Malfunction Indicator Lamp*) [4, 12].

Natężenie prądu pobieranego przez elektryczny rozrusznik samochodowy stanowi jeden z sygnałów, wykorzystywany w badaniach diagnostycznych. Powszechnie przyjmuje się, że stan techniczny rozrusznika w chwili uruchamiania silnika odpowiada stanowi technicznemu rozrusznika sprawnego. Błąd stosowanych metod diagnostycznych prowadzi do nieustalonych stanów eksploatacyjnego zużycia rozrusznika. Producenci rozruszników nie udostępniają informacji o eksploatacyjnym zużyciu. Rozrusznik wymienia się, gdy nie spełnia swojej funkcji [5, 6, 9].



Rys. 1. Schemat strukturalny układu rozruchowego

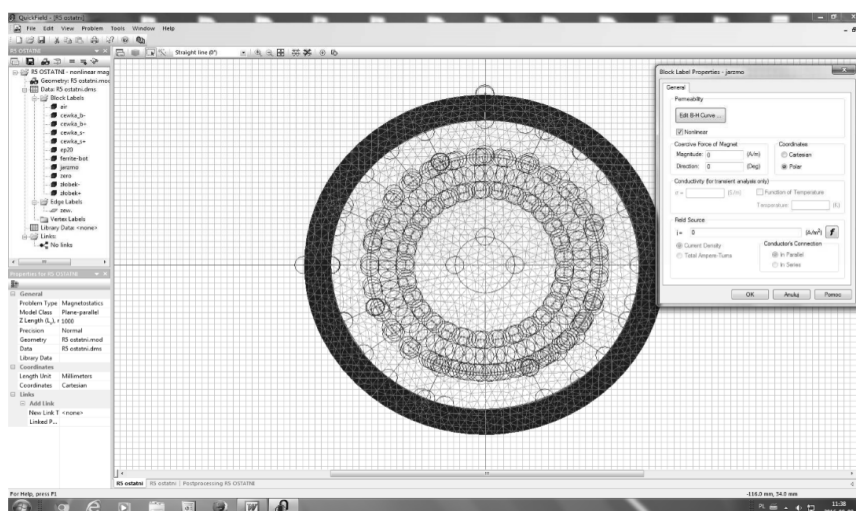
Układ rozruchowy silnika spalinowego składa się z rozrusznika elektrycznego, akumulatora oraz przewodów. Rozrusznik zbudowany jest z silnika elektrycznego, wyłącznika elektromagnetycznego, wałka z prowadnicą, mechanizmu z przekładnią planetarną oraz sprzęgła jednokierunkowego. Pracuje on w trudnych warunkach eksploatacyjnych, w efekcie podlega różnego rodzaju uszkodzeniom, do których należą: zwarcie, przerwa, utlenienie, zużycie oraz pęknięcia. Na stan techniczny układu rozruchowego wpływa moment dokręcenia przewodów oraz stan naładowania akumulatora. Wśród typowych objawów niesprawności rozrusznika można wymienić: brak obrotu wirnika rozrusznika, brak zazębienia z wieńcem koła zamachowego silnika spalinowego oraz nadmierny hałas generowany przez mechanizm sprzęgający. Do parametrów diagnostycznych układu rozruchowego należy natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik oraz wartości spadków napięć na poszczególnych elementach układu

rozruchowego: zaciskach biegunowych akumulatora, stykach prądowych rozrusznika, przewodzie łączącym rozrusznik z akumulatorem i połączeniu elektrycznym z masą pojazdu [3]. Schemat strukturalny układu rozruchowego z zestawieniem rodzajów uszkodzeń oraz stanów niezdatności przedstawia rys. 1.

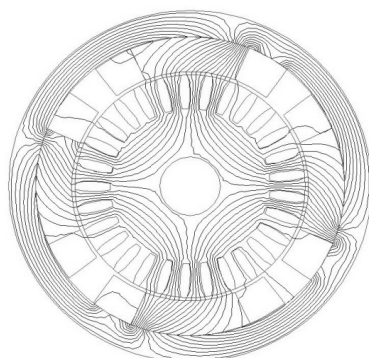
2. BADANIA SYMULACYJNE W PROGRAMIE QUICKFIELD

Badania symulacyjne układu rozruchowego przeprowadzono z wykorzystaniem programu QuickField. Program ten umożliwia wizualizację analizy pola magnetycznego do celów diagnostycznych. Analiza pola magnetycznego w programie QuickField przeprowadzana jest z wykorzystaniem metody elementów skończonych [8].

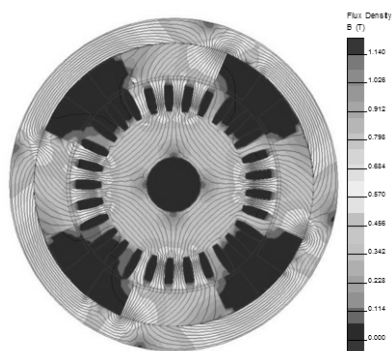
Wykorzystując program QuickField zdefiniowano geometrię układu rozrusznika R5 określając jego wymiary rzeczywiste oraz ilość żłobków i wycinków komutatora (rys. 2). Do programu wprowadzono krzywe magnesowania materiałów dla wirnika i stojana. Analizę pola magnetycznego przeprowadzono symulując przerwy i zwarcia, dokonując analizy rozptyłu strumienia i rozkładu indukcji w rozruszniku. Symulację przeprowadzając do programu wyłączenie uzwojeń (przerwy) oraz zmienne wartości prądu (zwarcia) w uzwojeniu wirnika. Wyniki obliczeń w postaci rozptyłu strumienia dla sprawnego rozrusznika, dla przerwy w jednym zwoju wirnika i zwarcia na dwóch wycinkach komutatora (rys. 3, rys. 5, rys. 7) oraz rozkładu indukcji magnetycznej dla sprawnego rozrusznika, dla przerwy w jednym zwoju wirnika i zwarcia na dwóch wycinkach komutatora (rys. 4, rys. 6, rys. 8) w rozruszniku R5.



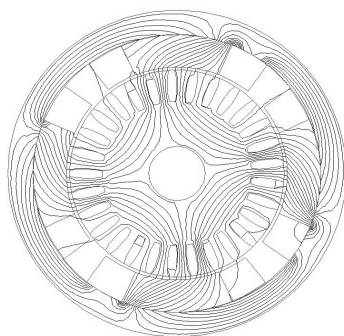
Rys. 2. Wprowadzenie danych rozrusznika do programu



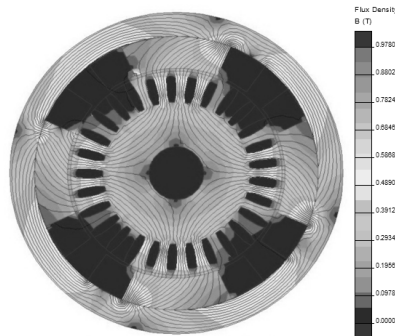
Rys. 3. Rozpływ strumienia magnetycznego dla sprawnego rozrusznika R5



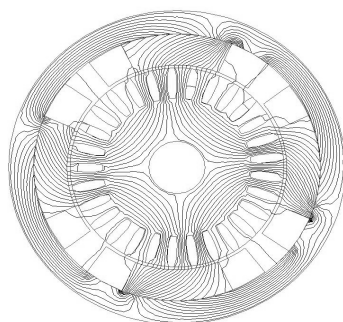
Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej dla sprawnego rozrusznika R5



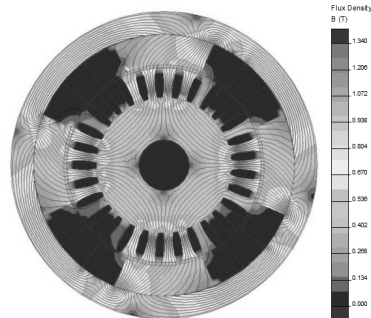
Rys. 5. Rozpływ strumienia magnetycznego dla przerwy w jednym zwoju uzwojenia wirnika rozrusznika R5



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej dla przerwy w jednym zwoju uzwojenia wirnika rozrusznika R5



Rys. 7. Rozpływ strumienia magnetycznego dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika R5



Rys. 8. Rozkład indukcji magnetycznej dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika R5

Wyznaczony rozptył strumienia magnetycznego w nabiegownikach i wirniku dla trzech analizowanych przypadków zachowuje symetryczny rozkład dla sprawnego, natomiast dla przerwy w jednym zwoju uzwojenia wirnika i dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora wykazuje zagęszczenie strumienia. Wyniki symulacji wskazują, że największe wartości indukcji magnetycznej występują w czterech odcinkach jarzma między nabiegownikami oraz szczelinie przyjarzmowej. Dla rozrusznika sprawnego maksymalna wartość indukcji wynosi 0,8 T; dla przerwy w jednym zwoju uzwojenia wirnika rozrusznika wartość indukcji magnetycznej wynosi 0,6 T natomiast dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika osiąga wartość 1 T.

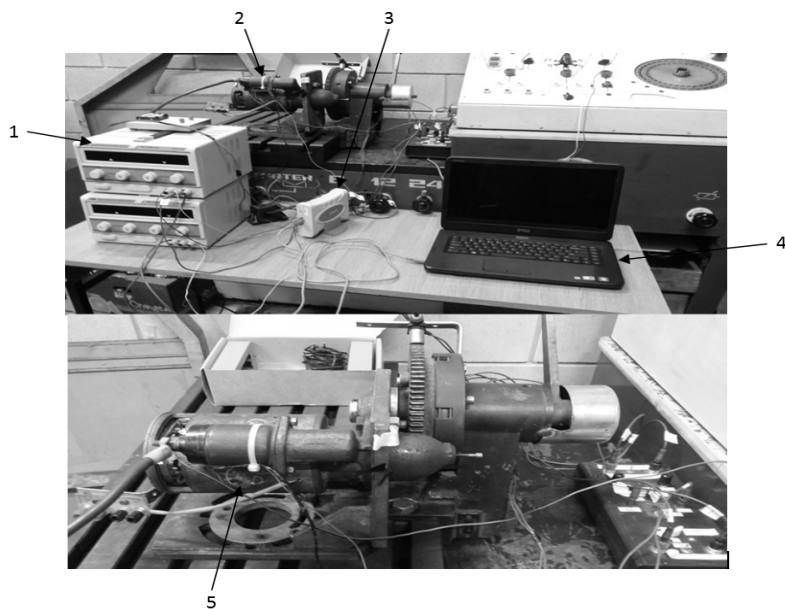
3. EKSPERYMENTALNE BADANIA NA STANOWISKU

Eksperymentalne badania weryfikacyjne rozrusznika przeprowadzono na stanowisku ELKON-SUPER 3 przedstawionym na rysunku 8. W skład stanowiska wchodzi badany rozrusznik R5 z czujnikiem hallotronowym umieszczonym w szczelinie przyjarzmowej oraz zestaw pomiarowy w postaci karty pomiarowej Ad-Link, komputera i dwóch zasilaczy. Pomiar polegał na włączeniu rozrusznika na biegu jałowym, a następnie przeprowadzono proces hamowania, aż do zatrzymania rozrusznika.

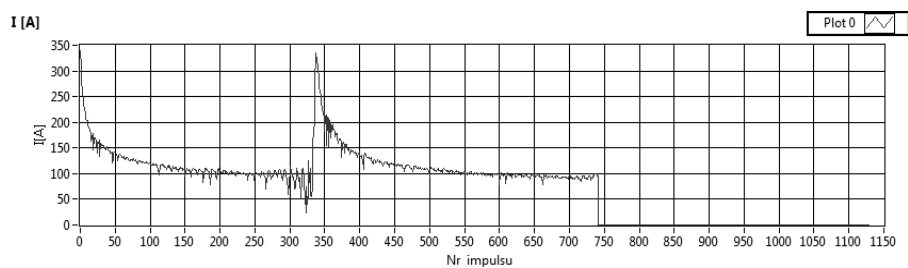
Program do wyznaczania charakterystyk rozrusznika napisany został w środowisku LabView. W pierwszym bloku programu ustala się częstotliwość i liczbę próbek do rejestracji. Rejestracja przeprowadzana jest w trybie dynamicznym [3]. Do rejestracji poszczególnych wielkości wykorzystano kartę pomiarową, do której doprowadzono kondycjonowane sygnały pochodzące z czujników i przetworników. Sygnał prądu pochodzi z czujnika LEM, który zapewnia izolację galwaniczną i kondycjonuje napięcie doprowadzone do kraty pomiarowej. Do pomiaru prędkości obrotowej użyto czujnika magnetorezystancyjnego KNI 15 z wyjściem prądowym, a do pomiaru indukcji w szczelinie przyjarzmowej wykorzystano czujnik Halla Allegro A1324.

Badania przeprowadzono dla rozrusznika sprawnego, dla przerwy w uzwojeniu wirnika oraz dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora.

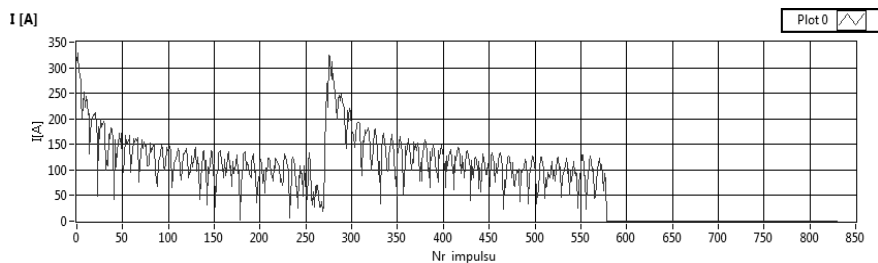
Na rysunkach 9–12 przedstawiono zarejestrowane przebiegi prądu dla rozrusznika sprawnego, dla przerwy w uzwojeniu wirnika oraz dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora. Z analizy charakterystyk wynika, że maksymalna wartość prądu dla rozrusznika sprawnego wynosi 330 A, dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika wynosi 320 A, natomiast dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika osiąga wartość 370 A. Dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika na wykresie widoczne są charakterystyczne pulsacje, nie występujące w pozostałych przebiegach.



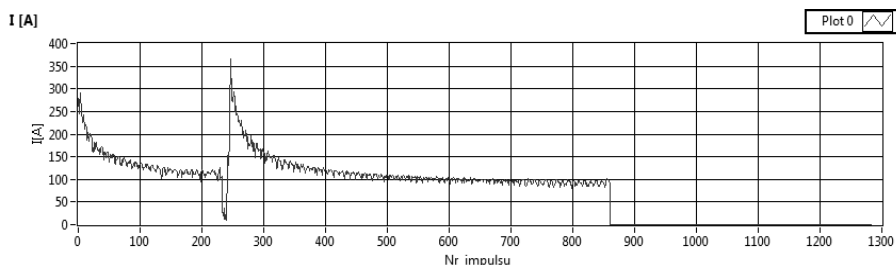
Rys. 9. Stanowisko do badania rozruszników ELKON SUPER 3; 1- zasilacze; 2 – badany rozrusznik; 3 – karta pomiarowa; 4 – komputer, 5 – czujnik hallotronowy umieszczony w rozruszniku



Rys. 10. Zarejestrowane przebiegi prądu dla rozrusznika R5 sprawnego

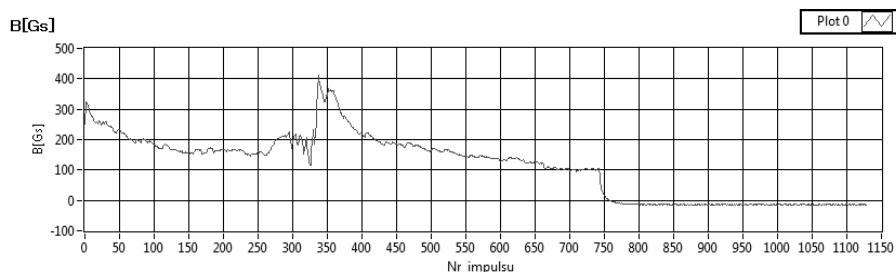


Rys. 11. Zarejestrowane przebiegi prądu dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika R5

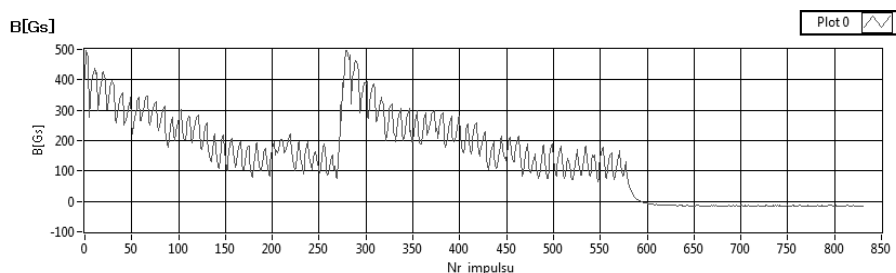


Rys. 12. Zarejestrowane przebiegi prądu dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika R5

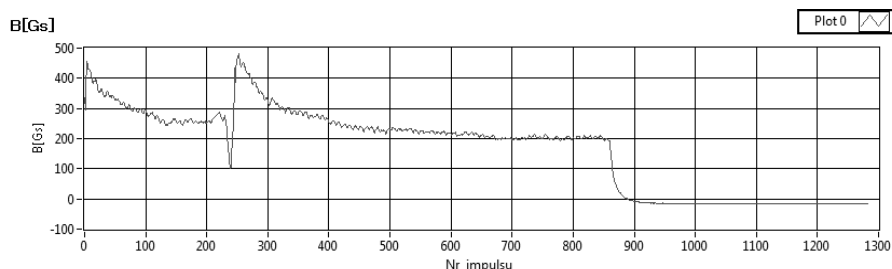
Na rysunkach 13–15 przedstawiono zarejestrowane przebiegi indukcji magnetycznej w szczelinie przyjazmowej dla rozrusznika sprawnego, dla przerwy w uzwojeniu wirnika oraz dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora. Z przedstawionych charakterystyk wynika, że maksymalna wartość indukcji dla rozrusznika sprawnego wynosi 410 Gs, dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika 500 Gs, natomiast dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora maksymalna wartość indukcji wynosi 480 Gs. Podobnie jak w przypadku charakterystyk prądu na wykresie przebiegu indukcji magnetycznej dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika występują charakterystyczne pulsacje.



Rys. 13. Zarejestrowane przebiegi indukcji magnetycznej dla rozrusznika R5 sprawnego

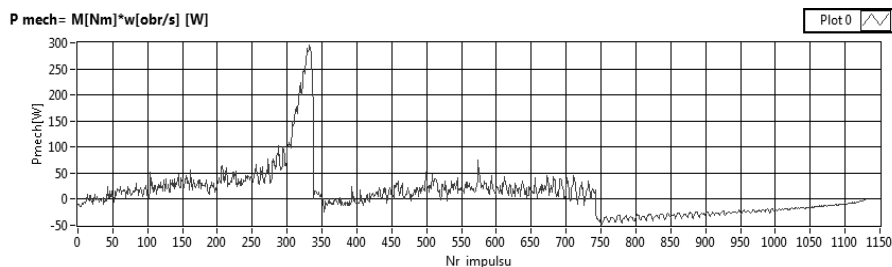


Rys. 14. Zarejestrowane przebiegi indukcji magnetycznej dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika R5

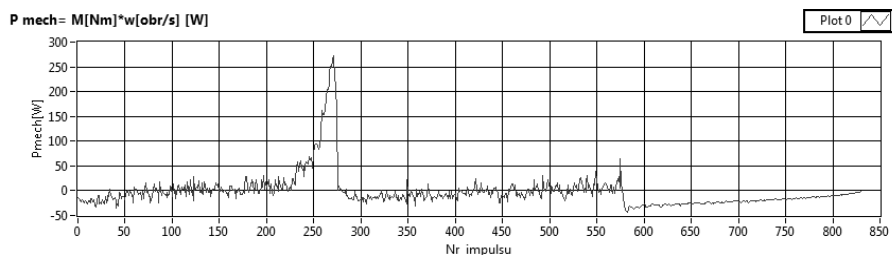


Rys. 15. Zarejestrowane przebiegi indukcji magnetycznej dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika R5

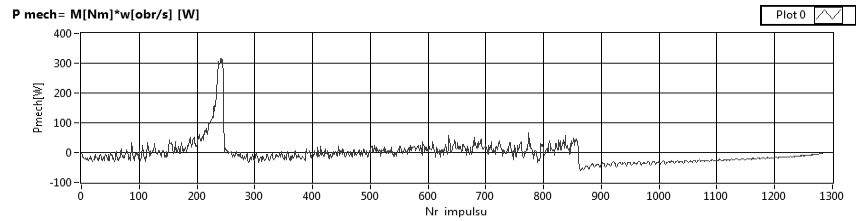
Wyniki charakterystyk mocy mechanicznej otrzymano rejestrując prędkość obrotową oraz moment hamowania rozrusznika. Wyniki badań dla rozrusznika sprawnego, dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika oraz dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika przedstawiono na rysunkach 16–18. Dla rozrusznika sprawnego maksymalna wartość mocy mechanicznej wynosi 290 W, dla przerwy w uzwojeniu wirnika zmniejsza się o 30 W, dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika moc maksymalna mechaniczna zwiększa się o 20 W w stosunku do rozrusznika sprawnego.



Rys. 16. Obliczone charakterystyki mocy mechanicznej dla rozrusznika R5 sprawnego



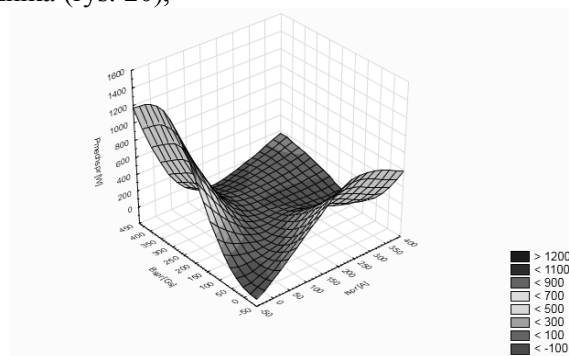
Rys. 17. Obliczone charakterystyki mocy mechanicznej dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika R5



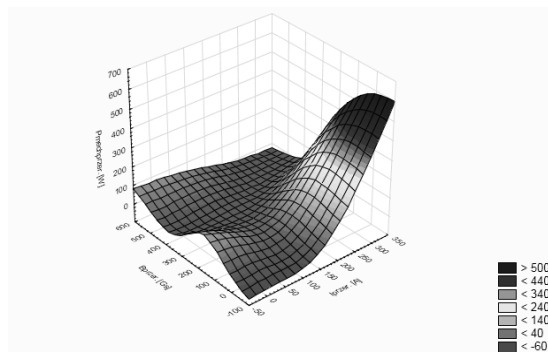
Rys. 18. Obliczone charakterystyki mocy mechanicznej dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika R5

Analizę otrzymanych wyników przeprowadzono wykorzystując program Statistica. Stosując wygładzanie najmniejszych kwadratów ważonych otrzymano wykresy powierzchniowe dla następujących wielkości:

- moc mechaniczna w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika sprawnego (rys. 19),
- moc mechaniczna w funkcji prądu i indukcji dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika (rys. 20),

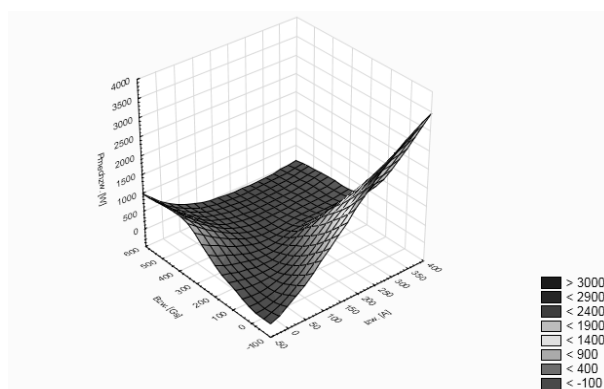


Rys. 19. Moc mechaniczna w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika sprawnego



Rys. 20. Moc mechaniczna w funkcji prądu i indukcji dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika

- moc mechaniczna w funkcji prądu i indukcji dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika (rys. 21).



Rys. 21. Moc mechaniczna w funkcji prądu i indukcji dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika

Porównując zależności mocy mechanicznej w funkcji prądu i indukcji można zauważyć zmianę wypukłości poszczególnych sygnałów dla rozrusznika sprawnego oraz dla uszkodzenia w postaci przerwy w jednym zwoju uzwojenia wirnika oraz dla zwarcia na dwóch wycinkach komutatora (rys. 19–21).

4. PODSUMOWANIE

Zaobserwowane wartości indukcji magnetycznej na podstawie przeprowadzonej w programie QuickField symulacji odzwierciedlają zbliżone wartości indukcji uzyskane w eksperymentalnych badaniach stanowiskowych na obiekcie rzeczywistym. Różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi z modelu, a wynikami badań na obiekcie rzeczywistym wynikają z: przyjętego uproszczenia modelu matematycznego siatki odwzorowania wirnika i stojana oraz błędu wynikającego z wprowadzonych krzywych magnesowania materiałów wirnika i stojana. Wyniki potwierdziły wpływ przerwy i zwarcia na maksymalną wartość indukcji magnetycznej.

Porównując wyniki charakterystyk prądu i mocy mechanicznej można stwierdzić, że największe wartości prądu i mocy mechanicznej występują dla zwarcia dwóch wycinków komutatora rozrusznika R5, zaś najmniejsze dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika.

Z analizy dwóch rodzajów sygnałów tj. prądu pobieranego przez rozrusznik oraz napięcia Halla w szczelinie przyjarzmostkowej rozrusznika wynika, że:

- do identyfikacji uszkodzenia w postaci przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika korzystniejszy jest sygnał napięcia Halla,

- do identyfikacji uszkodzenia w postaci zwarcia na dwóch wycinkach komutatora rozrusznika niezbędny jest sygnał prądu rozrusznika i napięcia Halla w szczelinie przyjarzmowej.

Zarejestrowane przebiegi indukcji magnetycznej dla rozrusznika sprawnego oraz dla przerwy w uzwojeniu wirnika rozrusznika i zwarcia na dwóch wycinkach komutatora pozwalają opracować wzorce diagnostyczne wykorzystując analizę FFT z zastosowaniem rejestracji komputerowej.

Opracowana metoda diagnostyczna, polegająca na analizie wyjściowych sygnałów elektrycznych rozrusznika, potwierdziła przydatność jej do oceny stanu technicznego rozrusznika.

LITERATURA

- [1] Anderson W., Starter basic, Old Cars Weekl, s. 1–3.
- [2] Bayir R., Condition monitoring and fault diagnosis of serial wound starter motor with learning vector quantization network, Journal of Applied Sciences, Nr 8, 2008, s. 3148–3156.
- [3] Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., Simulation tests of the starting system, Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Nr 88, ISSN 1897–0737, Poznań 2016, s. 89–100.
- [4] Dziubiński M., Modelowanie i eksperymentalne badania obwodu rozruchowego w środkach transportu, Monografia, Politechnika Lubelska, ISBN 978–83–7947–205–5, Lublin 2016.
- [5] Enache B., Lefter E., Modeling aspects of an electric starter system for an internal combustion engine, 6th International Conference on Electronics Computers and Artificial Intelligence (ECAI), ECAI 2014–International Conference, Bucharest 2014, s. 39–42.
- [6] Füvesi V., E. Kovács, Diagnoses of additive faults of serial wounded motor using artificial intelligence methods, Recent Innovations in Mechatronics, Volume 1, Number 1–2, 2014.
- [7] Ma Q., Rajagopalan S., Yurkovvich S., Guezennec Y., A high fidelity starter model for engine start simulations, 2005 American Control Conference. June 8 – 10, Portland 2005, s. 4423–4427.
- [8] Prauzner T., Modelowanie działania czujki magnetycznej w programie Quick-Field jako przykład wykorzystania E–Technologii w metrologii elektrycznej, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 37, 2014, s. 125–129.
- [9] Pszczółkowski J., Trawiński G., Napędzanie wału korbowego silnika rozrusznikiem elektrycznym i pneumatycznym, Logistyka, Nr 6, 2011, s. 3499–3508.
- [10] Uysal A., Bayir R., Real time condition monitoring and fault diagnosis in switched reluctance motors with Kohonen neural network, Journal of Zhejiang University Science C (Computers&Electronics), Number 14, ISSN 1869–1951, 2013, s. 941–952.

- [11] Wang W., FEA based structure optimization for the drive end housing of an automotive starter, International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization. IEEE Computer Society, Nr 8, 2008, s. 447–450.
- [12] Zeng S., Sun B., Tong Ch., Zmodyfikowany model prognozowania niezawodności urządzeń elektronicznych, Eksploatacja i Niezawodność, Nr 4, 2009, s. 4–9.

FAILURE SIMULATION OF THE AUTOMOTIVE STARER

This article applies to the area of research related to the newly developed method of diagnosis of the starter motor with the use of the analysis of the characteristics of the starter power and the distribution of magnetic induction. New in the article is to use QuickField software to analyze the propagation flow and distribution of magnetic induction for failure analysis in the form of break and short-circuit rotor of the starter motor. The verification of the results was carried out on a real object by recording the distribution of magnetic induction by means of a Hall sensor placed in the starter link slot. The study made it possible to develop a diagnostic patterns for selected starters failure using computer registration.

(Received: 04. 02. 2017, revised: 16. 02. 2017)