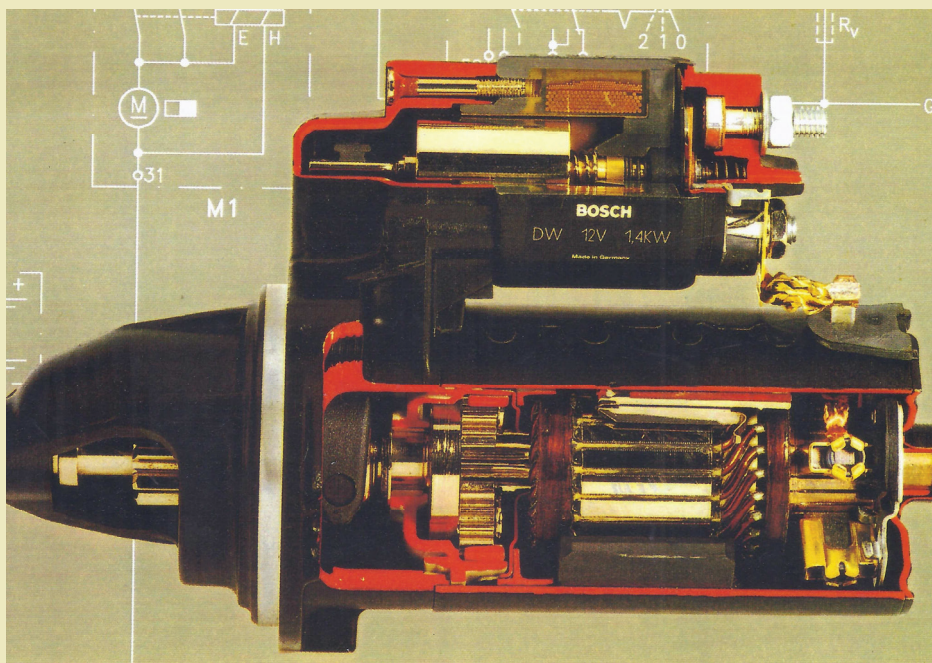


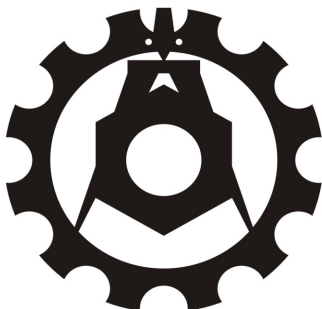
Mieczysław Dziubiński

Modelowanie i eksperymentalne badania obwodu rozruchowego w środkach transportu



Modelowanie i eksperymentalne
badania obwodu rozruchowego
w środkach transportu

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Mieczysław Dziubiński

Modelowanie i eksperymentalne badania obwodu rozruchowego w środkach transportu



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Andrzej Ambrozik, Politechnika Świętokrzyska
dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-205-5

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Streszczenia	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	9
1. Wprowadzenie	11
2. Cel naukowy monografii.....	14
3. Analiza literaturowa eksploatacji i diagnostyki rozruszników	17
3.1. Diagnostowanie eksploatacyjne.....	20
3.1.1. Elementy eksploatacji	20
3.2. Modele diagnostyczne	22
3.3. Analiza metod diagnostycznych	22
4. Problematyka badawcza i zakres pracy	28
5. Charakterystyka obwodu rozruchu	31
5.1. Rozruch silnika spalinowego	31
5.2. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika.....	33
6. Model analityczny obwodu rozruchowego	36
6.1. Model obliczeniowy rozrusznika.....	36
6.2. Model charakterystyk mocy rozrusznika w programie LabView	44
7. Badania eksploatacyjne uszkodzeń rozruszników	46
7.1. Analiza uszkodzeń rozruszników.....	48
7.2. Zestawienie uszkodzeń rozruszników.....	55
7.3. Model niezawodnościowy rozrusznika w programie AgenaRisk.....	58
7.4. Model niezawodnościowy nadmiarowości w rozrusznikach samochodowych	63
7.5 Model niezawodnościowy rozrusznika	65
7.6. Model diagnostyczny rozrusznika w programie Matlab i Matlab Simulink.....	69
7.7. Modelowanie rozkładu strumienia dla wybranych stanów eksploatacyjnych w programie QuickField	79
8. Eksperymentalne badania symulacyjne układu rozruchowego.....	82
8.1. Pomiar napięcia i poboru prądu podczas włączania rozrusznika.....	82
8.2. Zestawienie wyników badań.....	87

8.3. Pomiar indukcji magnetycznej poprzez rejestrację napięcia Halla w szczelinie przytwornikowej rozrusznika R76 i R5	89
8.3.1. Oscylogramy przebiegu napięcia Halla dla rozrusznika R76, hallotron umieszczony na wirniku	91
8.3.2 Oscylogramy przebiegu napięcia Halla dla rozrusznika R5, hallotron umieszczony na nabiegunniku	94
9. Przeprowadzenie wybranych badań weryfikacyjnych	98
9.1. Badanie rozrusznika R76 (silnik szeregowy)	98
9.2. Badania symulacyjne rozrusznika CT36021 (silnik z magnesami trwałymi)	102
9.2.1. Wyniki pomiarów zarejestrowanych wielkości	104
9.3. Badania weryfikacyjne rozruszników E100 (silnik szeregowo- -bocznikowy)	111
9.4. Badania weryfikacyjne rozrusznika R5 (silnik szeregowy)	114
10. Opracowanie wyników	123
10.1. Wprowadzenie	123
11. Analiza prądu rozruchu silnika spalinowego	131
11.1. Model prądu rozruchu	131
11.2. Wykorzystanie algorytmu obliczania momentu oporowego silnika spalinowego na podstawie zarejestrowanych przebiegów elektromechanicznych rozrusznika	138
11.3. Przeprowadzenie badań weryfikacyjnych prądu rozruchu	146
11.3.1. Wyniki pomiarów prądu rozruchu dla silnika Opla, wtrysk MULTEC jednopunktowy	146
11.3.2. Wyniki pomiarów prądu rozruchu dla silnika 1500, wtrysk Bosch MA 1.7 czterocylindrowego	149
12. Podsumowanie	153
Literatura	156

Streszczenie

Monografia poświęcona jest zagadnieniom związanym z rozruchem silników spalinowych. Celem naukowym monografii jest opracowanie i zbadanie metod oraz środków technicznych przeznaczonych do dozoru eksploatacyjnego obwodu rozruchowego pojazdów samochodowych. Dla realizacji celu naukowego przyjęto jako niezbędne opracowanie modelu matematycznego zespołu rozrusznik-akumulator umożliwiającego diagnozowanie stanu technicznego rozrusznika i prognozowanie przebiegu zmian jego standardowych charakterystyk w trakcie eksploatacji samochodu oraz przeprowadzenie weryfikacji modelu na podstawie badań eksperymentalnych. Do rejestrowanych wielkości należą napięcie na rozruszniku, prąd pobierany przez rozrusznik, prędkość obrotowa i moment rozrusznika. Na podstawie tych wielkości wyznaczono moc elektryczną i mechaniczną rozrusznika. Do rejestracji rozkładu strumienia magnetycznego wykorzystano czujniki hallotronowe. W ramach badań eksploatacyjnych przeprowadzono analizę uszkodzeń rozruszników, na podstawie której opracowano model niezawodnościowy nadmiarowości rozruszników z podziałem na części mechaniczne i elektryczne. Do analizy rozkładu strumienia magnetycznego dla wybranych stanów eksploatacyjnych został wykorzystany program QuickField. Przeprowadzono eksperymentalne badania dla czujników umieszczonych na wirniku, nabiegunniku oraz w szczelinie przyjarzmowej, rejestrując sygnał napięcia Halla dla wybranych uszkodzeń rozrusznika. W pracy autor przedstawił analizę prądu rozruchu silnika spalinowego na podstawie modelu prądu rozruchu wykorzystując algorytm obliczania momentu oporowego silnika spalinowego na podstawie zarejestrowanych przebiegów elektromechanicznych rozrusznika. W dalszej części przeprowadził badania weryfikacyjne prądu rozruchu dla czterech silników spalinowych. W rozprawie przedstawiono metodę wyznaczania momentu oporowego silnika spalinowego z wykorzystaniem sygnału z czujnika Halla w szczelinie przyjarzmowej rozrusznika.

Słowa kluczowe: obwód rozruchowy, modelowanie charakterystyk rozrusznika, prąd rozruchu, pole magnetyczne w rozruszniku, diagnostyka

Summary

The monograph is devoted to issues related to the starting of internal combustion engines. The scientific goal of the study is to develop and explore methods and technical means for the operation surveillance of the starting system in vehicles. For the achievement of this objective it was considered necessary to develop a mathematical model of the starter-battery team, allowing to diagnose the technical condition of the starter and forecasting changes in the course of its normal characteristics during operation of the vehicle, as well as verification of the model on the basis of experimental research. The registered parameters include the voltage at the starter, the current consumed by the starter, and the starter's rotation speed and torque. On the basis of these values the electrical and mechanical power of the starter were determined. To register the distribution of magnetic flux Hall sensors were used. The operation study includes an analysis of damaged starters, on the basis of which a reliability model of starter redundancy was developed, with a subdivision into mechanical and electrical parts. For the analysis of the magnetic flux distribution for selected operation states the QuickField program was used. Experimental studies were conducted for sensors placed on the rotor, the pole pieces and the yoke gap, recording the Hall voltage signal for selected starter damage. The study presents an analysis of the engine – starting current using an algorithm for calculating the resistance torque of the internal combustion engine based on the starter's recorded electromechanical waveforms. This is followed by verification of the starting current carried out for four combustion engines. The dissertation discusses a method of determining the resistance torque of the internal combustion engine using the signal from the Hall sensor in the starter's yoke gap.

Keywords: starting system, modelling the starter's characteristics, starting current, magnetic field in the starter, diagnostics

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	liczba par gałęzi równoległych
A	wartość okładu prądowego wirnika
a	liczba par gałęzi równoległych twornika
aes	liczba gałęzi równoległych uzwojenia wzbudzenia
bb	szerokość rdzenia bieguna
bbuw	szerokość wewnętrznego otworu uzwojenia wzbudzenia
Bdel	indukcja magnetyczna w szczelinie przytwornikowej
bj	długość jarzma
bn	długość łuku nabiegunnika
bozl	szerokość otwarcia żłobka
bPr	szerokość pręta twornika
bPu	szerokość pręta uzwojenia wzbudzenia
bszcz	szerokość szczotki
bzl	szerokość żłobka
D	średnica wirnika
D	zewnętrzna średnica wirnika
deltaj	szczelina przyjarzmowa
Djw	wewnętrzna średnica jarzma
Dk	średnica komutatora
DI	średnica zewnętrzna łożyska
Dn	średnica wewnętrzna rozmieszczenia nabiegunników
dPr	średnica pręta twornika
Drw	średnica wewnętrzna korpusu rozrusznika
Drz	średnica zewnętrzna korpusu rozrusznika
dus	spadek napięcia na szczotkach
Dw	średnica pakietu wirnika
Dw	średnica wału w miejscu osadzenia blach wirnika
E	siła elektromotoryczna
etaz	zakładana sprawność silnika
hb	wysokość rdzenia bieguna
hj	grubość jarzma
hn	wysokość nabiegunnika
hozl	wysokość otwarcia żłobka
hPr	wysokość pręta twornika
bu	szerokość uzwojenia wzbudzenia
hszcz	wysokość szczotki
hu	wysokość uzwojenia wzbudzenia
hz	wysokość żebra
hzl	wysokość żłobka

In	prąd znamionowy
K	liczba wycinków komutatora
k ₁	współczynnik strat w łożyskach zależny od smaru
k _{Fe}	współczynnik wypełnienia pakietu blach twornika
kteta	współczynnik wzrostu rezystancji uzwojeń
l	długość twornika
lb	długość rdzenia bieguna
lb _w	długość wewnętrznego otworu uzwojenia wzbudzenia
l _K	długość korpusu
L _{kom}	długość komutatora
lszcz	długość szczotki
mit	współczynnik tarcia szczotek o komutator
n	prędkość obrotowa silnika rozrusznika przy mocy znamionowej
η	sprawność rozrusznika
N	liczba czynnych prętów uzwojenia wirnika
N	liczba prętów twornika
p	liczba par biegunów
P _n	moc znamionowa
P _{nsz}	nacisk na szczotkę
P _w	moc elektryczna
Q _b	pojemność baterii akumulatorów
r ₁	promień zaokrąglenia żłobka
R _p	rezystancja przewodów
R _p	opór przewodów łączących akumulator z rozrusznikiem
ru	promień wewnętrznego zaokrąglenia uzwojenia wzbudzenia
S _{pu}	przekrój przewodu nawojowego
S _w	przekrój przewodu nawojowego uzwojenia wirnika
U	napięcie baterii akumulatorów
U _n	napięcie znamionowe na rozruszniku
Z _c	ilość zwojów
zlob	liczba żłobków
zu _w	liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia na 1 biegun
ż	liczba żłobków wirnika
γ _{Cu}	przewodność miedzi
δ _{Cu}	gęstość miedzi
ΔU _{sz}	spadek napięcia pod szczotkami

1. Wprowadzenie

Ze względu na ekologiczne wymagania motoryzacji coraz większą uwagę przykładą się do utrzymania silnika w należytym stanie technicznym, gwarantującym zanieczyszczenia powietrza na jak najniższym poziomie. Obecnie silniki samochodowe poddawane są regularnej diagnozie po zaobserwowaniu przez użytkownika niepokojących objawów, m. in. takich jak zwiększone zużycie paliwa, odczuwalny spadek mocy i momentu obrotowego, brak rozruchu.

Diagnostyczny system kontroli dostępny jest poprzez wykorzystywanie jednego typu znormalizowanego testera diagnostycznego, który może być stosowany do wszystkich rodzajów pojazdów. Diagnostyka prowadzona z wykorzystaniem elektronicznych przyrządów odczytujących i dekodujących usterki nie gwarantuje postawienia szczegółowej diagnozy występowania uszkodzenia. Problem jest w tym, że system samodiagnozy nie ogranicza się do stwierdzenia usterki pojedynczego elementu, ale ocenia działanie podukładów elektrycznych, elektronicznych i mechanicznych oraz współpracę pomiędzy nimi. Oznacza to, że sygnalizuje wadliwe działanie nie tylko jakiegoś obwodu elektronicznego, ale i problemy czysto mechaniczne, które mogą spowodować pojawienie się kodu usterki w pamięci sterownika.

Ponieważ poziom zawansowania technicznego konstruowanych silników ciągle wzrasta, trzeba liczyć się z tym, że sposób ich diagnozowania będzie coraz bardziej skomplikowany i będzie wymagał coraz bardziej doskonałego sprzętu diagnostycznego.

Typowe wyposażenie elektryczne pojazdów samochodowych obejmuje:

- maszyny elektryczne (prądnica, rozrusznik, dmuchawa, wycieraczki),
- aparaty elektryczne (akumulator, rozdzielacz zapłonu, cewka zapłonowa, sygnał dźwiękowy, reflektory, oświetlenie, wskaźniki),
- sieć przewodową (przewody i wiązki przewodów niskiego napięcia, przewody wysokiego napięcia),
- sprzęt instalacyjny (łączniki, przełączniki, złącza płytkowe, bezpieczniki, wyłącznik zapłonu).

Każda instalacja elektryczna w samochodzie obejmuje kilka obwodów, które pełnią określone zadania, a urządzenia i maszyny elektryczne będące w tych obwodach spełniają ściśle określone funkcje. Przyjęte jest wyróżnienie następujących obwodów:

1. obwód zasilania, który obejmuje alternator z regulatorem oraz akumulator,
2. obwód rozruchu, który zawiera akumulator, wyłączniki, rozrusznik i urządzenia wspomagające rozruch,
3. obwód zapłonowy zawierający czujniki, sterownik i świece zapłonowe,

4. obwody sygnalizacji,
5. obwody oświetlenia,
6. obwody urządzeń kontrolno-pomiarowych,
7. obwody urządzeń pomocniczych,
8. obwody urządzeń dodatkowych.

Każdy z wyżej wymienionych obwodów monitorowany jest w postaci lampki kontrolnej lub informacji w komputerze pokładowym, jedynie obwód rozruchu nie posiada takich możliwości, który jest odpowiedzialny za rozruch silnika spalinowego.

Na właściwości rozruchowe silnika wpływa wiele czynników, takich jak:

- dawka rozruchowa paliwa,
- prędkość obrotowa niezbędna do uzyskania rozruchu,
- minimalny czas rozruchu za pomocą rozrusznika,
- jakość oleju silnikowego,
- stan instalacji rozruchowej i naładowania akumulatora,
- stopień sprężania,
- przełożenie rozrusznik – koło zamachowe,
- stan urządzeń ułatwiających rozruch (świece żarowe, świece płomieniowe, podgrzewacze).

Rozruch silnika z zapłonem samoczynnym polega na dostarczeniu z zewnątrz, przez rozrusznik, momentu rozruchowego do wału korbowego silnika i rozpędzeniu go do minimalnej prędkości obrotowej, przy której sprężone powietrze w komorze spalania silnika osiągnie temperaturę wyższą od temperatury samozapłonu wtrysniętego oleju napędowego. Proces ten w temperaturze wyższej niż 273 K (0°C) przebiega z reguły prawidłowo i nie występują wówczas trudności z uruchomieniem silnika. W niższych temperaturach otoczenia rozruch jest utrudniony i wymaga stosowania urządzeń wspomagających rozruch.

We współczesnych samochodowych silnikach spalinowych niezbędną energię mechaniczną potrzebną do zainicjowania ich samodzielnego działania przekazuje się najczęściej poprzez napędzenie wału korbowego za pomocą rozrusznika elektrycznego zasilanego z akumulatora. Zadaniem rozrusznika jest wprowadzenie w ruch zespołów silnika, pokonanie rozruchowego momentu oporowego i momentu sił bezwładności mas wirujących oraz nadanie wałowi korbowemu wymaganej prędkości kątowej rozruchu.

Współczesne rozruszniki składają się z silnika prądu stałego, mechanizmu sprzęgającego oraz zębniaka. Rozruszniki o mniejszej mocy są włączane jedno-stopniowo, zaś o większej dwustopniowo. Dzięki zastosowaniu włączania dwustopniowego uzyskuje się korzystniejszy przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Ze względu na występujące podczas rozruchu silnika zmiany wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, stosuje się w nich szeregowo lub szeregowo-bocznikowe silniki prądu stałego. Silniki

szeregowe charakteryzują się dużym momentem rozruchowym. W silnikach szeregowo-bocznikowych prądu stałego zastosowane jest dodatkowe uzwojenie bocznikowe i mogą one pracować przy małych obciążeniach występujących na biegu jałowym. Uzwojenie to pozwala na znaczne zmniejszenie wartości prędkości kątowej wirnika, a tym samym zwiększenie trwałości rozrusznika. Kiedy podczas uruchamiania silnika spalinowego prędkość kątowa wału korbowego osiągnie określoną wartość następuje, poprzez sprzęgło jednokierunkowe, odłączenie rozrusznika elektrycznego. Zabezpiecza to rozrusznik przed uzyskaniem znacznych prędkości obrotowych rzędu 10000 obr/min, a tym samym przed zniszczeniem.

2. Cel naukowy monografii

Celem naukowym monografii jest opracowanie i zweryfikowanie metod oraz środków technicznych przeznaczonych do eksploatacyjnego dozoru obwodu rozruchowego w środkach transportu.

Dla realizacji celu naukowego pracy niezbędne było opracowanie matematycznego modelu zespołu rozrusznik-akumulator, umożliwiającego diagnozowanie stanu technicznego rozrusznika i prognozowanie przebiegu zmian jego standardowych charakterystyk w trakcie eksploatacji samochodu, oraz przeprowadzenie weryfikacji modelu na podstawie badań eksperymentalnych.

Idea pracy sprowadza się do stwierdzenia, że takie wielkości elektryczne jak: napięcie, natężenie prądu i indukcja magnetyczna w szczelinie przytwornikowej mogą być wykorzystane jako sygnały diagnostyczne określające jednoznacznie stan zdadności obwodu rozruchowego, a w ograniczonym zakresie również rodzaj uszkodzenia.

W diagnostyce funkcjonalnej wielkości elektryczne wykorzystywane są jako sygnały diagnostyczne. Istota problemu polega na określeniu wpływu zjawisk wywołanych zużyciem eksploatacyjnym elementów rozrusznika oraz zmianami rezystancji w obwodzie zasilania na przebiegi charakterystyk obwodu rozruchowego. Opracowany model umożliwia ocenę stanu technicznego obwodu rozruchowego.

Tematyka badań wpisuje się w zakres prowadzonych w kraju badań dotyczących diagnostyki i niezawodności silników samochodowych i wpływu ich stanu na ekologię. Z powodu braku dostatecznej znajomości procesów fizyko-chemicznych leżących u podstaw zagadnień tarcia i zużycia elementów. Modelowanie i prognozowanie przebiegu zużycia eksploatacyjnego opiera się głównie na badaniach empirycznych.

Natężenie prądu pobieranego przez elektryczny rozrusznik samochodowy stanowi sygnał diagnostyczny, wykorzystywany w praktyce eksploatacyjnej (np. przy ocenie szczelności komory spalania) oraz badaniach naukowych nad nowymi metodami diagnozowania stanu technicznego. Powszechnie przyjmuje się, że stan techniczny rozrusznika w chwili diagnozy odpowiada stanowi technicznemu rozrusznika nowego bądź, że przebieg zmian natężenia prądu nie zmienia się w sensie jakościowym w czasie eksploatacji samochodu. Błąd stosowanych metod diagnostycznych wynikający z przyjęcia takich założeń jest trudny do oszacowania z powodu braku dostatecznych danych eksploatacyjnych (nie przewiduje się okresowych obsług eksploatacyjnych sprawnych rozruszników w pojazdach, zaś producenci osprzętu nie udostępniają informacji na ten temat). Rozrusznik podlega wymianie (naprawie) wówczas, gdy nie spełnia swojej funkcji.

Przeprowadzone w pracy modelowanie poszerza dotychczasowy stan wiedzy, pozwalając na ocenę użyteczności pomiarów natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik do nowych zastosowań diagnostyczno-niezawodnościowych i umożliwia wdrożenie do oceny stanu krytycznego rozrusznika z wykorzystaniem MIL (Malfunction Indicator Lamp). Na podstawie wyników badań będzie możliwe określenie procedur okresowych kontroli stanu technicznego rozruszników silników samochodowych i wdrożenie praktyczne.

Rozwiązanie postawionego problemu poszerza stan wiedzy w zakresie tematyki badań i wnosi wkład do dyscypliny naukowej diagnostyka w kraju i na świecie ponieważ jest to problem nowy i pozwala na kontynuowanie i rozszerzenie procedur OBD (On Board Diagnosis).

Zagadnienia związane z niezawodnością i prognozowaniem stanów granicznych eksploatacji obiektów technicznych stanowią przedmiot prowadzonych badań naukowych w różnych aspektach. W przypadku procesów degradacji o podłożu tribologicznym nie występuje spójna teoria, która w sposób przekonujący i wierny tłumaczy zjawiska zmiany kształtu i wymiarów geometrycznych elementów maszyn elektrycznych-rozruszników w ujęciu ilościowym. Funkcjonujące modele ujmują zjawiska w sposób niepełny i nie umożliwiają formułowania diagnoz.

Na podstawie analizowanej literatury [21, 22] poświęconej zagadnieniom charakterystyk roboczych rozruszników w funkcji czasu eksploatacji, brak jest danych związanych z zużywaniem się elementów mechanicznych w parach kinematycznych rozruszników. Zebranie w ramach eksperymentu biernego materiału badawczego dotyczącego rozruszników jest trudne, gdyż w czasie eksploatacji producenci samochodów nie przewidują okresowych obsług rozruszników. Rozruszniki wymienia się (ewentualnie naprawia) dopiero wtedy, gdy nie pozwalają na uruchomienie samochodu. Z tego względu stacje serwisowe dysponują jedynie informacjami o osiągnięciu stanu granicznego eksploatacji, bez znajomości historii obiektu. Z fragmentarycznych danych eksploatacyjnych wynika, że uszkodzeniom parametrycznym (o kumulacyjnym charakterze powstawania) towarzyszą często uszkodzenia nagłe (o charakterze losowym). Prognozowanie niezawodności maszyn elektrycznych pojazdów samochodowych wymagało szczegółowej analizy rodzaju uszkodzenia oraz czynników, które sprzyjają ich powstawaniu (zmienność temperatura, wilgotność, drgania, zmienne obciążenie). Nieznane są w literaturze opracowania na temat modelowania warunków pracy tych maszyn.

Ze względu na łatwość i dużą dokładność pomiaru, analizę przebiegu natężenia prądu pobieranego przez samochodowy rozrusznik elektryczny wykorzystuje się jako sygnał diagnostyczny. Sygnał ten służyć może do oceny szczelności poszczególnych cylindrów silnika. Przy odciętym zasilaniu paliwa, napędza się rozrusznikiem wał korbowy nagrzanego silnika i porównuje maksymalne wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik występujące w chwili przechodzenia poszczególnych tłoków przez położenie zwrotne

zewnętrzne w cylindrach silnika. Analizuje się także amplitudę natężenia prądu względem wartości średniej oraz zmianę prędkości kątovej wału korbowego. Zbyt mała amplituda przy znacznym wzroście prędkości kątovej wskazuje na zużycie tulei cylindrowych silnika. Należy zaznaczyć, że metoda ta opiera się między innymi na założeniu, że stan techniczny rozrusznika podczas badań odpowiada stanowi technicznemu rozrusznika nowego, co niekiedy jest zbyt dużym uproszczeniem. W miarę zużywania się łożysk wirnika rozrusznika wzrastają opory ruchu, co powoduje wzrost wartości średniej natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik.

Podjęcie analizy nad modelami oceny stanu technicznego obwodu rozruchowego, pozwala na określenie prawdopodobieństwa udanego rozruchu silnika. Przebieg rozruchu modelowany jest jako proces stochastyczny z czasem ciągłym o skończonej liczbie stanów. Przeprowadzenie klasyfikacji stanów procesu wymaga przeprowadzenia analizy sygnałów diagnostycznych: zmian natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz prędkości kątovej wału korbowego silnika. Znajomość charakterystyk rozrusznika w czasie eksploatacji daje możliwość oceny przydatności sygnału diagnostycznego jakim jest prąd pobierany przez rozrusznik w czasie rozruchu. Znajomość przebiegu eksploatacyjnych zmian stanu technicznego rozrusznika ułatwia prognozowanie procesu odnowy stanu eksploatacyjnego.

Dla weryfikacji opracowanych modeli zaprojektowano stanowiska do badań rozruszników i odpowiednio je przygotowano. Podczas weryfikacji wykorzystana aparatura pomiarowa wymagała zaprojektowania torów pomiarowych oraz rejestracji poszczególnych sygnałów rozszerzając o czujniki hallotronowe do pomiaru rozkładu pola magnetycznego w szczelinie wirnik – stojan, prędkości obrotowej i momentu oraz pomiaru wielkości elektrycznych. Do pomiarów wykorzystano karty pomiarowe do komputera PC oraz przetworniki AD – LINK wraz z oprogramowaniem do analizy sygnałów. Wymiernym efektem podjętego problemu naukowego jest opracowanie metody diagnozowania obwodu rozruchowego oraz opracowanie koncepcji metody określania momentu oporowego silnika spalinowego z wykorzystaniem pomiaru pola magnetycznego w rozruszniku. Wbudowanie na stałe w rozruszniku czujnika mierzącego wielkość indukcji w szczelinie przytwornikowej pozwala zrezygnować z pierwszego równania układu 11.21, tym samym uniknąć błędu związanego między innymi ze zmianą rezystancji uzwojenia stojana i twornika powodowanych ciągłym nagrzewaniem i stygnięciem w czasie prób rozruchu.

3. Analiza literaturowa eksploatacji i diagnostyki rozruszników

Zagadnieniami eksploatacji, diagnostyki i niezawodności zajmuje się zespół pod opieką autora w Politechnice Lubelskiej. Zespół ten prowadzi badania nad możliwością wykorzystania zjawiska Halla do opracowania metody, pozwalającej na ocenę eksploatacyjnego zużycia rozrusznika w środkach transportu. Zagadnieniami tymi zajmowali się naukowcy w Indiach [150–153] oraz naukowcy z Francji [5, 135–137]. Badania związane z analizą pola magnetycznego prowadzone są przez Politechnikę Warszawską [191,192] oraz naukowców z Węgier [17, 84–86, 132, 207] i Chin [103, 111, 227].

Ośrodki badawcze w Japonii [108, 109, 188] i Niemczech [217] koncentrują się na analizie i doskonaleniu konstrukcji układu komutator-szczotka.

Głównym celem badań zespołu badawczego w ośrodku Łódzkim [21, 22, 193] było określenie zmian stanu technicznego łożysk rozrusznika zachodzących w trakcie eksploatacji.

Badania wyłączników elektromagnetycznych oraz mechanizmów sprzęgających prowadzone są przez naukowców z Węgier [159] oraz Politechnikę Łódzką [235].

Analizą pracy rozrusznika w fazie rozruchu zajmował się zespół w Politechnice Lubelskiej [49, 50], Wojskowej Akademii Technicznej [179–182] oraz naukowcy z Turcji [8–12, 219] i USA [144, 190].

Badania dotyczące analizy pracy rozrusznika w fazie rozruchu prowadziła niemiecka firma Bosch w ośrodku naukowym w Stuttgarcie. Firma ta opracowała metodę polegającą na pomiarze prądu pobieranego przez rozrusznik w fazie rozruchu, pozwalającą pośrednio określić ciśnienie sprężania w poszczególnych cylindrach.

Badania związane z rozrusznikami z magnesami trwałymi i przekładnią planetarną prowadzone są w Politechnice Wrocławskiej [29–34, 51–53] z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) do analizy konstrukcji i rozkładu pola elektromagnetycznego.

Zespół naukowy z Czech opublikował wiele artykułów dotyczących nowych rozwiązań konstrukcyjnych rozruszników [104, 105, 175].

Badania obwodu rozruchowego wykonuje się za pomocą przyrządów pomiarowych, które stanowią główny składnik systemu diagnostycznego. W skład tego systemu wchodzi ponadto procedury i narzędzia zapewniające zbieranie i przetwarzanie informacji diagnostycznych podczas utrzymywania zdolności technicznej.

Diagnostyka urządzeń elektrycznych w środkach transportu polega na pomiarze prądów i spadków napięć w poszczególnych punktach oraz wielkości nielektrycznych takich jak prędkość kątowna.

Diagnostyka rozrusznika zajmuje się oceną stanu technicznego, prognozowaniem zdolności technicznej, a w przypadku zaistnienia niesprawności lub uszkodzenia – generowanie przyczyn zaistniałego stanu.

Posługiwanie się wszystkimi elementami wiedzy i praktyki diagnostycznej, wymaga posiadania dla każdego wymienionego obszaru działalności eksploatacyjnej odpowiednich metod, procedur i narzędzi diagnostycznych.

Znaczenie diagnostyki w eksploatacji rozruszników wynika z funkcji:

- decyzyjnej, stanowiącej podstawę do zakwalifikowania rozrusznika jako zdolnego technicznie;
- prognostycznej, stanowiącej podstawę do przewidywania stanu zdolności w założonym czasie;
- prewencyjnej, stanowiącej podstawę do wykonania wymaganej odnowy oraz planowania i realizacji działań ograniczających intensywność zużycia się elementów rozrusznika;
- korekcyjnej, stanowiącej podstawę do wnioskowania o potrzebie modernizacji cech konstrukcyjnych rozrusznika, technicznego procesu eksploatacji, w tym metod, procedur i narzędzi diagnostycznych.

Wymienione funkcje realizowane są w procesach diagnostycznych zawierających wykonywanie czynności i elementarnych procesów, takich jak: diagnozowanie obejmujące kontrolę stanu i opracowanie diagnozy podczas eksploatacji w chwili t_0 , genezowanie stanu (najczęściej niepożądanego) zaistniałego w przeszłości w chwili $t_0 - \Delta t_g$, prognozowanie stanu w zakładanym horyzoncie czasu eksploatacji $t_0 - \Delta t_p$, monitorowanie, dozorowanie.

Proces diagnostyczny jest to proces analizowania sygnałów, w czasie którego w wyniku uzyskiwania i przetwarzania informacji zmienia się stopień nieokreśloności stanu technicznego diagnozowanego obiektu; efektem końcowym tego procesu jest diagnoza.

Stan techniczny obiektu jest definiowany w kategoriach jakości i bezpieczeństwa jego działania, poprzez wektor miar bezpośrednich lub pośrednich. Aktualny stan obiektu technicznego można określać, obserwując funkcjonowanie obiektu, to znaczy jego wyjście głównie przekształconej energii (lub produktu), gdzie obserwuje się procesy resztkowe, np. termiczne, wibracyjne, akustyczne, elektromagnetyczne. Obserwacja tych wyjść daje możliwości diagnozowania stanu poprzez:

- obserwacje procesów roboczych, przy monitorowaniu ich parametrów w sposób ciągły, czy też prowadzeniu badań sprawnościowych maszyn na specjalnych stanowiskach (moc, prędkość, ciśnienie itp.);
- badania jakości wyrobów, zgodności pomiarów, pasowań, połączeń itp., im lepsza jakość produkcji, tym lepszy stan techniczny obiektu technicznego;
- obserwacje procesów resztkowych, stanowiących bazę wielu atrakcyjnych metod diagnostycznych, opartych głównie na modelach symptomowych.

Proces diagnozowania obejmuje:

- analizę danych zarchiwizowanych w czasie eksploatacji,
- przetwarzanie informacji diagnostycznych,
- syntezę diagnozy i opracowanie prognozy.

Diagnozowanie obejmuje zbiór działań mających na celu określenie stanu obwodu rozruchowego [15, 47, 96, 215].

Kontrola jego stanu to proces wielokrotnie powtarzany, mający na celu zbieranie, przetwarzanie i ocenę informacji o właściwościach badanego obiektu.

Diagnoza jest to określenie stanu obiektu, wynik analizy i syntezy diagnostycznej, określenie jednej lub kilku cech wyznaczających stan obiektu lub najbardziej prawdopodobny stan obiektu.

Genezowanie jest to proces diagnostyczny mający na celu określenie stanu obiektu w czasie przeszłym oraz ustalenie przyczyn zmiany stanu, na podstawie badania w danej chwili. Dotyczy głównie pierwotnych stanów uszkodzeniowych. Wiarygodność genezy zależy w dużym stopniu od znajomości poprzednich stanów obciążeń obiektu. Genezowanie powinno towarzyszyć diagnozowaniu. Prawidłowa geneza może mieć decydujący wpływ na właściwą naprawę, na zmianę konstrukcji, zmianę procesu technologicznego lub zmianę obciążeń.

Prognozowanie jest to proces diagnostyczny mający na celu określenie stanu obiektu w przyszłości w założonym czasie lub ustalenie przedziału czasu, w którym nie nastąpi zmiana stanu, na podstawie badania w danej chwili.

Dozorowanie jest to diagnozowanie ciągłe; jest ciągłą lub dyskretną obserwacją stanu obiektu.

Stosowane są dwa sposoby dozorowania obiektów:

- dozorowanie równoległe polega na ciągłej obserwacji symptomów diagnostycznych i równoległym wnioskowaniu diagnostycznym,
- dozorowanie sekwencyjne polega na sekwencyjnej obserwacji symptomów diagnostycznych i równoległym wnioskowaniu diagnostycznym.

Diagnozowanie rozrusznika jest działaniem wieloetapowym, sukcesywnie zwiększającym wiedzę o nim, dla którego to wypracowuje się diagnozę.

Główne problemy diagnostyki rozruszników obejmują:

- pozyskiwanie i przetwarzanie informacji diagnostycznej,
- budowę modeli i relacji diagnostycznych,
- wyznaczanie poziomów diagnostycznych i wartości granicznych,
- wnioskowanie diagnostyczne,
- klasyfikację stanów badanych obiektów,
- obrazowanie informacji decyzyjnych (diagnozy, prognozy, genezy).

Aby diagnostyka była skuteczna, w szczególności diagnostyka eksploatacyjna, wymaga skutecznych metod, procedur i narzędzi.

3.1. Diagnozowanie eksploatacyjne

3.1.1 Elementy eksploatacji

Eksploatacja jest to zespół celowych działań organizacyjno-technicznych i ekonomicznych związanych z obiektem technicznym oraz wzajemne relacje, występujące pomiędzy nimi od chwili przejęcia obiektu do wykorzystania zgodnie z przeznaczeniem, aż do jego likwidacji. Eksploatacja jest działaniem, w którym wyznacza się: cel, warunki, środki, planuje przebieg i wynik [18, 54, 110, 138, 140, 160].

Warunki eksploatacji wyznaczają charakterystyki infrastruktury otoczenia dla podsystemów użytkowania i utrzymywania. Środki eksploatacji to minimalna liczba systemu eksploatacji rozrusznika potrzebna do wykonania zadania rozruchu silnika lub maksymalna liczba podsystemów eksploatacji rozrusznika, jaką można przedstawić systemowi operacyjnemu w przypadku maksymalizacji celu zadań. Przebieg eksploatacji natomiast to planowe działanie z uwzględnieniem kolejności.

Wynik działań eksploatacyjnych powinien być planowany z najwyższą wartością prawdopodobieństwa jego osiągnięcia, z uwzględnieniem takich działań wyprzedzających, jakie zapewnią planowany wynik.

W eksploatacji obiektu technicznego wyróżnia się stan graniczny techniczny i stan graniczny eksploatacji. Stanem granicznym technicznym posługuje się zarówno w stosunku do elementu, jak i całego obiektu technicznego. Definiuje on granicę wymagań cech istotnych, przekroczenie której oznacza uszkodzenie pociągające za sobą niesprawność elementu, zespołu lub obiektu technicznego, albo częściową niesprawność całego obiektu technicznego. Stan ten kwalifikuje obiekt do stanu niezdatności.

Stan graniczny eksploatacyjny obiektu technicznego wyznacza dopuszczalną wartość wielkości eksploatacyjnej (trwałość techniczna), przekroczenie której może doprowadzić do uszkodzenia lub przekroczenia zakładanego poziomu ekonomicznego eksploatacji.

Stan graniczny techniczny przekraczany jest losowo, w sposób niezależny od człowieka, choć może się on przyczynić do jego zaistnienia. Przeciwdziała się przekroczeniu takiego stanu, stosując odpowiednie metody diagnostyczne i prognostyczne, prognozując czas miejsca istnienia przekroczenia stanu w warunkach użytkowania obiektu technicznego.

Stan graniczny eksploatacyjny jest znany, zakładany jako wynik badań, doświadczeń eksploatacyjnych lub analiz operacyjno ekonomicznych. Zatem jego przekroczenie w sposób świadomy jest raczej niemożliwe.

Zjawiska i zdarzenia eksploatacyjne jako typowe cechy systemu eksploatacji rozwijają się według modeli warstw. Modele zjawiskowe i ocenowe doprowadzają do modelu decyzyjnego.

Modele systemów eksploatacji można klasyfikować z różnych punktów widzenia. Dla potrzeb dalszych rozważań, jako istotne kryteria podziału tego typu modeli można przyjąć: przeznaczenia modelu, formę przekazu modelu, przydatność decyzyjną modelu.

Ze względu na przeznaczenie rozróżnia się:

- modele badawcze,
- modele pragmatyczne.

Diagnozowanie eksploatacyjne stwarza warunki do prawidłowej eksploatacji rozrusznika. Warunkiem trafnych decyzji eksploatacyjnych jest dokładna i wiarygodna diagnoza jako wynik poprawnie zrealizowanego procesu diagnostycznego.

W tabeli 3.1. przedstawiono podstawowe pojęcia diagnostyczne.

Tabela 3.1. Podstawowe pojęcia diagnostyczne

Nazwa	Opis
Symptom diagnostyczny	Miara sygnału wywołanego przez uszkodzenie, pozwalająca wnioskować o właściwościach obiektu technicznego.
Sygnał diagnostyczny	Sygnał generowany przez badany obiekt techniczny, wykorzystywany w diagnozowaniu.
Model obiektu diagnostowania	Sformalizowany opis obiektu technicznego niezbędny do diagnozowania.
Parametr stanu obiektów	Wyróżniona wartość wielkości opisująca stan obiektu technicznego.
Relacja diagnostyczna	Przyporządkowanie symptomowi cech stanu obiektu technicznego.
Wnioskowanie diagnostyczne	Przetwarzanie wyników badania diagnostycznego oraz innych informacji o obiekcie technicznym i jego otoczeniu na diagnozę.
Urządzenie diagnostyczne	Środek techniczny wbudowany w obiekt lub znajdujący się poza obiektem, za pośrednictwem którego przeprowadza się diagnozowanie.

Najważniejszą informację diagnostyczną mają te wielkości fizyczne, które wiążą się bezpośrednio ze stanem obiektu w relacji równoważności. Zasada ta ma zastosowanie do przypadków, w których do opisu stanu obiektu wystarczy jedna wielkość fizyczna. W przypadku diagnozowania obiektów złożonych np. elektronicznych, które realizują jednocześnie wiele zadań, opis stanu musi obejmować wyznaczenie konkretnych wartości dla wielu wielkości fizycznych zwanych symptomami. W diagnostyce istnieje wiele możliwych relacji pomiędzy uszkodzeniem obiektu i symptomami, które mogą być jednoznaczne lub niejednoznaczne.

3.2. Modele diagnostyczne

Model diagnostyczny jest narzędziem pozwalającym opisać obiekt i jego zachowanie się w różnych warunkach, za pomocą relacji diagnostycznej na zbiorze cech stanu i zbiorze symptomów. Model diagnostyczny nie opisuje zjawisk zachodzących w obiekcie, a tylko ich skutki [58, 115, 129, 161, 198, 230, 237].

Wykorzystując zbiory cech stanu i symptomów, wyróżnia się dwa podstawowe typy modeli: symptomowe i strukturalne, do opisu których stosuje się kategorie parametrów zdeterminowanych lub losowych, zależnie od zewnętrznych czynników zakłócających. Najczęściej używanym modelem jest model symptomowy, w którym do opracowania diagnoz wykorzystuje się reguły decyzyjne w postaci parametru funkcji lub macierzy, niejednoznaczne związki: symptomy-uszkodzenia.

Matematyczny symptomowy model diagnostyczny buduje się z relacji przestrzeni symptomów i reguł decyzyjnych, które w wyniku wykorzystania funkcji przejścia pozwalają opracować diagnozę stanu obiektu.

Model diagnostyczny powinien wyznaczyć stan obiektu technicznego, który ma być podstawą jego racjonalnej eksploatacji. Już na etapie projektowania i konstruowania obiektu powinny być opracowywane modele diagnostyczne dla wszystkich zespołów, algorytmy diagnozowania, metody, procedury i narzędzia diagnostyczne, a także określona podatność na odnowę w przypadkach wskazanych jako konieczne dla utrzymania zdadności technicznej.

Istnieje duża grupa praktycznych modeli diagnostycznych możliwych do wykorzystywania, dających dobre narzędzia, interpretację i sposoby opisu dla obserwowanych zjawisk w zespołach i instalacjach.

3.3. Analiza metod diagnostycznych

Podstawową zasadą diagnozowania obwodu elektrycznego w pojazdach samochodowych jest sprawdzenie jego kompletności i ciągłości. W przypadku diagnozowania obwodu rozruchu poddaje się sprawdzeniu obwód od źródła zasilania (akumulatora) do odbiornika (rozrusznika) z uwzględnieniem obwodu sterowania (wyłącznik rozrusznika, ciągnio, wyłącznik rozruchu), połączenia elektryczne (złącza i nakrętki) [45, 94, 95, 216]. Połączenia te mogą ulec uszkodzeniu na skutek utlenienia lub drgań w pojeździe.

Badania stanu technicznego rozrusznika można przeprowadzić przy zastosowaniu następujących metod:

- bezpośrednio w pojeździe, podczas próby rozruchu oraz przy zastosowaniu podstawowych przyrządów pomiarowych,
- po demontażu rozrusznika z pojazdu i sprawdzeniu go na stanowisku laboratoryjnym.

Pierwsza z metod stosowana jest do oceny charakteru uszkodzenia. Stosuje się ją także w bieżących naprawach drogowych oraz jako czynność wstępną do ścisłej kontroli w warunkach warsztatowych. Metoda ta polega na kolejnej

eliminacji z obwodu części elementów prawidłowo działających i nieuszkodzonych, aż do zlokalizowania źródła niesprawności obwodu. Druga z metod jest warsztatowym przeglądem rozrusznika dla sklasyfikowania jego zużycia lub znalezienia uszkodzonej części.

Badania stanu technicznego obwodu rozruchowego najczęściej obejmują oględziny zewnętrzne, sprawdzenie poprawności działania rozrusznika i ciągłości obwodu rozruchowego, pomiar napięcia zasilającego rozrusznik i spadków napięcia. Diagnostykę obwodu rozruchu przeprowadza się w pojeździe przy rozgrzanym silniku, przy uruchomionym rozruszniku. Dokładne sprawdzenie poprawności działania rozrusznika przeprowadza się na stanowisku laboratoryjnym po wymontowaniu go z pojazdu.

Badanie obwodu rozruchowego rozpoczyna się od sprawdzenia: kompletności obwodu i prawidłowości połączeń, możliwości uruchomienia silnika oraz natychmiastowego wyłączenia się rozrusznika po rozpoczęciu pracy silnika. W przypadku wykrycia niesprawności należy wykonać pomiary spadków napięć na poszczególnych połączeniach elektrycznych obwodu zasilania rozrusznika.

Wartości spadków napięć na poszczególnych elementach obwodu rozruchowego obrazuje jakość pracy obwodu. Spadki napięć mierzone są na:

- połączeniach elektrycznych przewodów z masą pojazdu,
- przewodach łączących poszczególne elementy obwodu,
- zaciskach styków prądowych rozrusznika oraz zaciskach akumulatora.

Podczas pomiarów wartość napięcia nie może być mniejsza niż 80% wartości napięcia znamionowego akumulatora. Mniejsze wartości świadczą o niesprawności akumulatora lub o nadmiernych spadkach napięć w przewodach i połączeniach. Jeżeli zmierzona wartość napięcia jest w granicach dopuszczalnych, a rozrusznik pracuje niewłaściwie, oznacza to, że jest on niesprawny.

Gdy mimo pozornej sprawności obwodu rozruchu, rozrusznik nie może nadać silnikowi właściwej prędkości rozruchowej sprawdza się stan szczotek, szczotkotrzymaczy, komutatora rozrusznika oraz możliwość wystąpienia zwarcia uzwojeń. Kontrolując stan szczotkotrzymaczy, należy zwrócić uwagę na jakość izolacji przewodów do nich dołączonych.

W przypadku zwarcia uzwojeń rozrusznika natężenie prądu przepływającego przez rozrusznik będzie miało wartość większą niż natężenie prądu pobieranego w okresie sprawności urządzenia. Jako prąd nominalny należy tu rozumieć wartość natężenia prądu, przy której rozrusznik rozwija moc maksymalną; wartość tę można określić na podstawie wykresów, charakterystyk rozrusznika. Przy uszkodzeniu komutatora lub szczotek natężenie prądu płynącego przez rozrusznik ma wartość mniejszą niż prądu pobieranego w okresie sprawności urządzenia.

Badania stanowiskowe rozruszników po wymontowaniu go z pojazdu obejmują cały zakres czynności do wykonania takich jak:

- sprawdzenie łożysk (tulei ślizgowych), szczotek, szczotkotrzymaczy, komutatora – elementy te w zasadniczy sposób wpływają na poprawność działania silnika elektrycznego rozrusznika. Kontrola szczotkotrzymaczy polega głównie na kontroli izolacji szczotkotrzymaczy szczotek dodatnich względem masy rozrusznika. Podobnie jak w wypadku kontroli wyłącznika elektromagnetycznego, przy kontroli elektrycznej sprawdza się siłę nacisku sprężyny szczotkotrzymacza (za pomocą dynamometru) i porównuje wynik pomiaru z danymi technicznymi;
- sprawdzenie wyłącznika elektromagnetycznego – kontrola podstawowa polega na sprawdzeniu działania wyłącznika przez bezpośrednie zasilanie wyłącznika elektromagnetycznego napięciem akumulatora. Próba ta powinna być uzupełniona pomiarem rezystancji uzwojeń wyłącznika, którego wynik porównuje się z danymi w dokumentacji technicznej. Niezależnie od tego, za pomocą próbnika lub omomierza sprawdza się zaciski i styki na zwarcie do obudowy. W wypadku wyłącznika elektromagnetycznego sprawdza się: stan sprężyny powrotnej rdzenia elektromagnesu, rdzeń i możliwość jego swobodnego przesuwania się wewnątrz korpusu z cewkami oraz sprawdzenie styków prądowych wyłącznika-gdy jest to możliwe. Niestety, w większości rozruszników ta część wyłącznika jest nierozbieralna;
- sprawdzenie zespołu sprzęgającego – pod wpływem nacisku ręki zespół sprzęgający powinien swobodnie przesuwać się po wałku wirnika rozrusznika (po wielowypuszcie). Zębnik ze sprzęgłem powinien swobodnie obracać się bez wirnika w jednym kierunku, natomiast podczas pokręcania go w przeciwną stronę z wirnikiem. Jeżeli zespół sprzęgający posiada łożysko (tuleję), to w przypadku dużego luzu promieniowego wymienia się łożysko (tuleję) na nowe;
- sprawdzenie uzwojeń stojana na zwarcie do masy – jest to kontrola stanu izolacji przewodów uzwojeń stojana względem masy;
- sprawdzenie uzwojeń stojana na zwarcie wewnętrzne – polega ono na pomiarze rezystancji i porównaniu wyniku pomiaru z danymi technicznymi. Ze względu na pewien rozrzut parametrów uzwojenia (wady technologii fabrycznej) przyjmuje się, że 5% różnicy pomiędzy pomiarem, a wskazaniem fabrycznym można uznać za wadę produkcyjną, ale jeszcze nie eliminującą uzwojeń, w razie większych rozbieżności uzwojenia należy wymienić na nowe;

- sprawdzenie uzwojeń wirnika na zwarcie z masą – jest to kontrola stanu izolacji przewodów uzwojenia wirnika względem jego masy. W wypadku wykrycia zwarcia, wirnik wymienia się na nowy. Przy okazji kontroli wirnika sprawdzaniu podlegają: jakość przylutowania przewodów uzwojenia do wycinków komutatora, ułożenie czoł uzwojeń i ciągłość ich izolacji, stan klinów usytuowanych w żłobkach.

Innym rodzajem badań rozruszników są badania stanowiskowe z jednoczesnym przeprowadzeniem prób na biegu jałowym oraz pod obciążeniem. Przy próbie biegu jałowego dokonuje się pomiaru prędkości obrotowej, poboru prądu i spadku napięcia na rozruszniku. Próbę przy obciążeniu przeprowadza się przy pełnym zahamowaniu wałka rozrusznika (stan zwarcia). W jej wyniku uzyskuje się wartości spadku napięcia, poboru prądu i momentu hamującego wałek.

Prowadzone próby pozwalają wykryć istnienie uszkodzeń uzwojeń wirnika lub wzbudzenia oraz wykonać ocenę stanu styków połączeń wewnętrznych. Na ich podstawie możemy wykonać charakterystykę badanego rozrusznika.

Właściwe funkcjonowanie rozrusznika zależy jednak przede wszystkim od pojemności i stanu naładowania akumulatora, stanu złącz elektrycznych, rezystancji przewodów itp., ponieważ niesprawności jednego z elementów obwodu pozbawia cały obwód cech użytkowych. Do jednoczesnej oceny stanu technicznego rozrusznika przy próbie stanowiskowej można wykorzystać:

- natężenie pobieranego prądu i prędkość obrotową podczas pracy rozrusznika na biegu jałowym (bez obciążenia); natężenie prądu nie powinno być większe, a prędkość obrotowa mniejsza od wartości dopuszczalnych dla danego typu rozrusznika; na podstawie wyników pomiarów można określić sprawność mechaniczną rozrusznika oraz wykryć zwarcia między uzwojeniami,
- natężenia prądu i momentu obrotowego przy całkowicie zahamowanym wirniku rozrusznika; rozrusznik nie powinien pobierać większej wartości prądu, a jego moment obrotowy nie powinien być mniejszy niż ustalone wartości dopuszczalne dla tych warunków,
- maksymalny moment obrotowy lub maksymalną moc przy zadanych napięciu.

Do celów diagnostycznych, podczas prób stanowiskowych przy biegu jałowym i pod obciążeniem rozrusznika, może być wykorzystana metoda charakterystyk, która polega na porównaniu uzyskanej podczas prób charakterystyki z charakterystyką wzorcową dla danego typu rozrusznika. Dysponując wzorcową charakterystyką rozrusznika, można dla określonych prędkości obrotowych porównać wartości pobieranego prądu po obciążeniu go odpowiednim momentem. Metoda ta nie daje jednak możliwości stwierdzenia rodzaju uszkodzenia.

Stan techniczny danego obiektu można ocenić dokonując demontażu jego części lub bez demontażu, wnioskując o zużyciu lub uszkodzeniu na podstawie analizy parametrów elektrycznych. Kwalifikację części przez pomiary ich zużycia stosuje

się w niektórych procesach naprawczych rozrusznika przy weryfikacji części pochodzących z rozebranych już obiektów. W procesie eksploatacji pojazdu z reguły wykorzystuje się metodę wnioskowania na podstawie objawów. Decydują o tym dwa czynniki: demontaż obwodu elektrycznego i pomiary jego części trwałyby zbyt długo i byłyby bardzo pracochłonne oraz każda rozbiórka i ponowny montaż powodują wydłużenie czasu naprawy danego urządzenia elektrycznego pojazdu.

Struktura wyposażenia elektrycznego pojazdu determinuje więc jego stan techniczny, a parametry struktury są parametrami stanu technicznego.

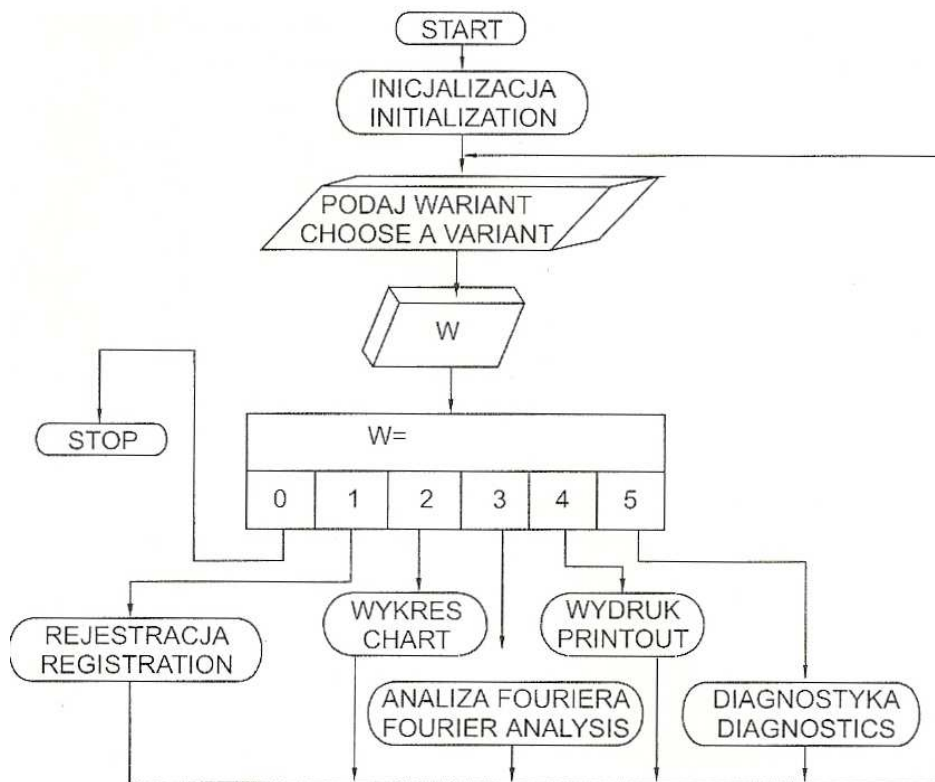
Procesy wyjściowe zachodzące podczas pracy urządzeń elektrycznych można podzielić na robocze które wynikają z realizacji funkcji urządzenia oraz towarzyszące, powstające jako wtórny efekt procesów roboczych. Procesy wyjściowe mogą być scharakteryzowane ilościowo zbiorem parametrów wyjściowych.

Parametr wyjściowy może zostać uznany za parametr diagnostyczny, jeżeli spełnia następujące warunki:

- jednoznaczności,
- każdej zmianie wartości parametru struktury odpowiada zdeterminowana zmiana wartości parametru wyjściowego,
- dostatecznej rozpiętości,
- oczekiwanej zmianie parametrów struktury odpowiada możliwie duży zakres zmian parametru wyjściowego,
- dostępności,
- zmiany parametru wyjściowego muszą być łatwo mierzalne.

Identyfikacja stanu technicznego obiektu wymaga podjęcia decyzji czy dane urządzenie elektryczne nadaje się do dalszej eksploatacji czy też wymaga regulacji lub naprawy. W przypadku wykrycia niesprawności identyfikacja powinna umożliwić jej lokalizację, tzn. dokonać stwierdzenia, który z elementów obiektu jest niesprawny [16, 19, 23, 56, 79, 82, 83, 113, 141].

Na rysunku 3.1 przedstawiono algorytm działania zestawu diagnostycznego rozrusznika. Procedura rozpoczęcia przygotowuje program do działania nadając odpowiednio zmiennym właściwe wartości, organizuje ekran graficzny oraz rozpoczyna pracę drukarki. Procedura rejestracja odczytuje sygnały z przetwornika analogowo-cyfrowego i umieszcza w pamięci RAM komputera. Procedura wykres umożliwia obserwację wybranego sygnału w funkcji czasu. Wynikiem działania procedury analiza Fouriera są wartości wybranego sygnału diagnostycznego.



Rys. 3.1. Algorytm działania zestawu diagnostycznego

4. Problematyka badawcza i zakres pracy

Wyniki przeprowadzonej w rozdziale trzecim analizy stanu wiedzy z zakresu problematyki eksploatacji i diagnozowania obwodu rozruchowego w środkach transportu wskazują na konieczność prowadzenia prac mających na celu zwiększenie trwałości oraz niezawodności wyposażenia elektrycznego. Ze wzrostem liczby pojazdów opracowuje się nowe i niezawodne metody diagnostyczne, które powinny stwarzać możliwość kontroli działania oraz bieżącego monitorowania podzespołów pojazdów w czasie eksploatacji. Takie wymagania mogą być spełnione jedynie przez zastosowanie automatyzacji badań.

Realizacja celu pracy wymaga przeprowadzenia obserwacji z koniecznością gromadzenia i przetwarzania danych niezbędnych do wnioskowania diagnostycznego oraz przeprowadzenia eksperymentów modelowania wspierających wnioskowanie. Dlatego też głównym celem przeprowadzonych badań było opracowanie modeli obwodu rozruchowego oraz metodyki badań w celu zgromadzenia wiedzy potrzebnej do budowy inteligentnego systemu monitorowania obwodu rozruchowego.

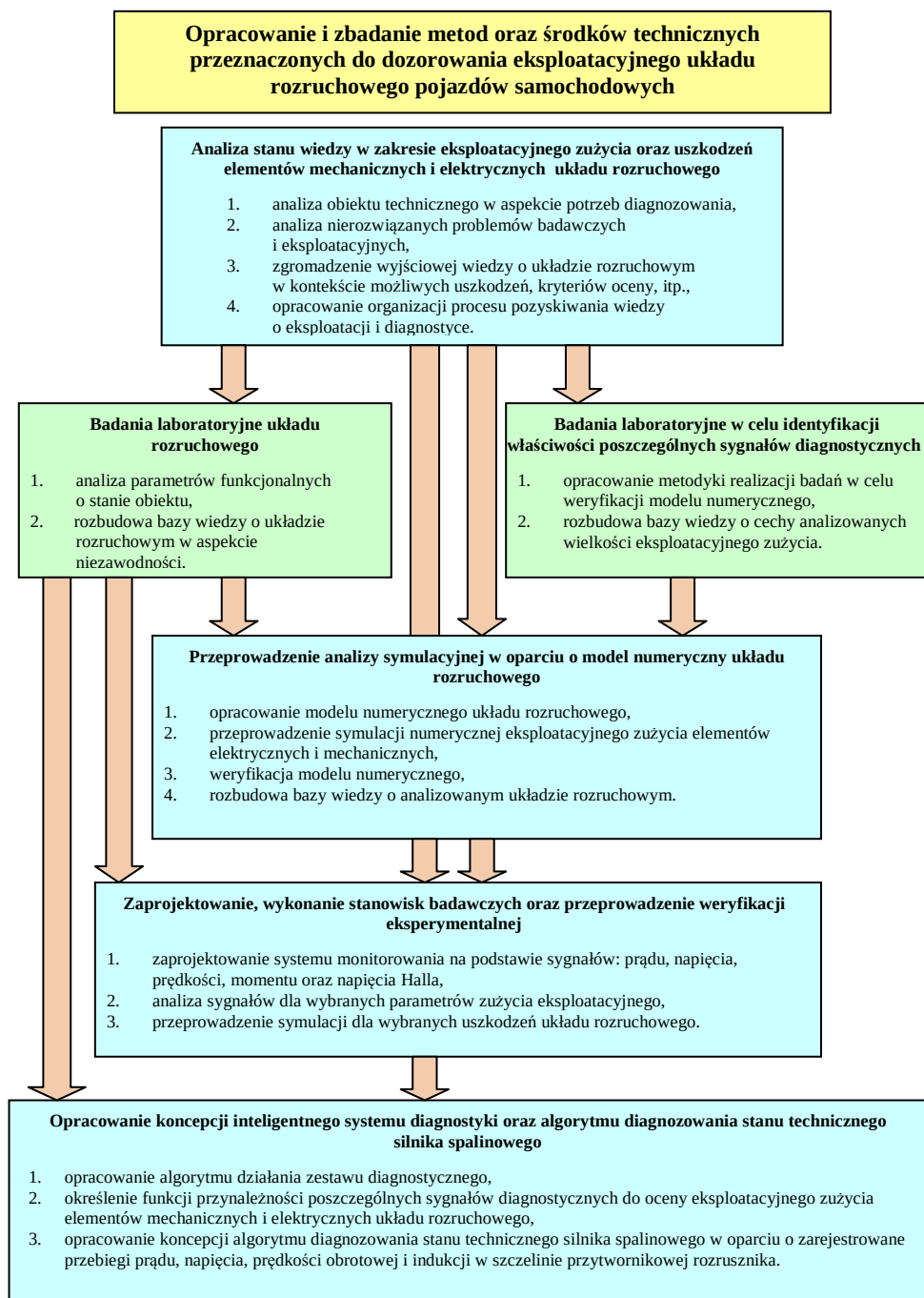
Osiągnięcie założonego celu wymaga zaplanowania oraz systematycznego przeprowadzenia wieloetapowych i wielowątkowych prac stanowiących realizację szeregu powiązanych ze sobą częściowych zadań badawczych:

1. W pierwszej kolejności niezbędne jest przeprowadzenie analizy obwodu rozruchowego i jej połączenia w ujęciu oceny potrzeb diagnozowania, czemu służy przegląd problematyki eksploatacyjnej, niezawodnościowej i badawczej w tym zakresie. Pozwoliło to na zgromadzenie niezbędnej wyjściowej wiedzy o analizowanym obwodzie rozruchowym w kontekście możliwych uszkodzeń, kryteriów oceny itp.
2. W dalszej kolejności niezbędne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych cech eksploatacyjnego zużycia obwodu rozruchowego w celu analizy nośników informacji o stanie obwodu. Badania te są elementem procedury diagnostycznej, której celem było znalezienie odpowiedzi na pytania: co mierzyć?, w jakim miejscu?, jak wnioskować stany graniczne? Wyniki badań laboratoryjnych zostały również wykorzystane do weryfikacji wykonanych modeli numerycznych eksploatacyjnego zużycia obwodu rozruchowego dla elementów mechanicznych i elektrycznych.
3. Kolejnym zadaniem badawczym jest przeprowadzenie analiz symulacyjnych w oparciu o model numeryczny obwodu rozruchowego. Do jego opracowania niezbędna jest jednak wcześniejsza realizacja badań laboratoryjnych w celu identyfikacji rodzaju uszkodzenia oraz jego wpływu na charakterystyki mocy obwodu rozruchowego. Zgromadzone dane o eksploatacyjnym zużyciu oraz laboratoryjne posłużyły do przeprowadzenia symulacji numerycznej wybranego eksploatacyjnego zużycia i wpływu jego na charakterystyki mocy rozrusznika.

4. Przeprowadzenie badań eksploatacyjnych, laboratoryjnych wraz z etapem modelowania numerycznego jest elementem tworzenia bazy wiedzy o analizowanym obwodzie rozruchowym. Zgromadzona w ten sposób wiedza, również w kontekście podatności diagnostycznej obiektu jest wykorzystana do zaprojektowania odpowiedniej metody diagnozy tj. systemu monitorowania obwodu rozruchowego z wykorzystaniem zjawiska Halla.
5. Opracowana metoda pomiaru oraz konstrukcja systemu monitorowania w kolejnym zadaniu badawczym zostaje poddana weryfikacji na obiektach rzeczywistych. Celem tego zadania badawczego jest ocena efektywności zastosowanej metody diagnostycznej w warunkach eksploatacji. Zgromadzone w trakcie pomiarów dane są wykorzystane do rozbudowy bazy wiedzy o analizowanym obwodzie rozruchowym.
6. Elementy mechaniczne oraz elektryczne obwodu rozruchowego ulegają eksploatacyjnemu zużyciu. A więc następuje ono sukcesywnie wraz ze wzrostem przebiegu samochodu. Istnieje zatem możliwość przewidywania chwili uszkodzenia w postaci granicznego eksploatacyjnego zużycia. Dlatego też wynikiem realizacji kolejnego zadania badawczego wykorzystującego opracowany system monitorujący utworzoną bazę wiedzy o obwodzie rozruchowym było opracowanie koncepcji inteligentnego systemu diagnostyki obwodu rozruchowego.

Tak zrealizowane zadania badawcze (rys. 4.1) posłużyły osiągnięciu celów naukowych prowadzonych prac jakimi są:

1. Analiza stanu wiedzy w zakresie eksploatacji, niezawodności i diagnozowaniu obwodu rozruchowego samochodu.
2. Zbudowanie bazy wiedzy w zakresie eksploatacyjnego zużycia obwodu rozruchowego z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych, eksploatacyjnych, niezawodnościowych oraz wyników modelowania numerycznego.
3. Opracowanie metodyki postępowania w zakresie identyfikacji rodzajów uszkodzenia obwodu rozruchowego oraz modelowania numerycznego w celu eliminacji popełnionych w tym zakresie błędów, uproszczeń oraz rozbieżności w uzyskiwanych wynikach.
4. Opracowanie wiarygodnego i uniwersalnego modelu numerycznego obwodu rozruchowego w oparciu o precyzyjnie określone wartości eksploatacyjnego zużycia elementów mechanicznych i elektrycznych obwodu rozruchowego w celu opracowania właściwej metody diagnostycznej.
5. Opracowanie metody monitorowania obwodu rozruchowego z wykorzystaniem pomiaru indukcji magnetycznej, która pozwala na wykorzystanie jej w celu określenia momentu oporowego silnika spalinowego.
6. Opracowanie koncepcji kompleksowego, zintegrowanego komputerowo systemu nadzoru obwodu rozruchowego z wykorzystaniem MIL (Malfunction Indicator Lamp) w rozszerzeniu układu OBD (On – Board Diagnosis).



Rys. 4.1. Zadania badawcze, cele ich realizacji oraz wzajemne powiązania

5. Charakterystyka obwodu rozruchu

5.1. Rozruch silnika spalinowego

Do rozruchu silników spalinowych stosuje się rozruszniki elektryczne wytwarzające duży moment obrotowy. Rozrusznik (rys.5.1) składa się z silnika szeregowego prądu stałego lub szeregowo-bocznikowego, mechanizmu sprzęgającego, który sprzęga się na czas rozruchu z wieńcem koła zamachowego silnika spalinowego.

Po zazębieniu z wieńcem koła zamachowego silnika moment napędowy jest przenoszony przez zębnik (koło zębate) rozrusznika na wał korbowy silnika. Energia potrzebna do rozruchu jest pobierana z akumulatora. Rozrusznik wprowadza w ruch koło zamachowe silnika. Wywołany w ten sposób ruch obrotowy wału korbowego jest zamieniany na ruch posuwisto-zwrotny tłoków w cylindrach. Moment oporowy silnika występujący w czasie rozruchu wywołany sprężaniem mieszanki paliwowej, tarciami tłoków, łożysk korbowych i wału korbowego, lepkością oleju i innymi czynnikami jest największy na początku rozruchu, a następnie znacznie maleje. Sumaryczny moment oporowy tarcia zwiększa się przy rozruchu silnika po długotrwałym postoju w niskiej temperaturze, gdyż wtedy znacznie wzrasta lepkość oleju. Ponadto podczas rozruchu należy pokonać moment oporowy bezwładności mas wirujących, głównie koła zamachowego, wału korbowego, korbowodu oraz napędzanych urządzeń pomocniczych: pomp, alternatora itp. [35, 57, 174].

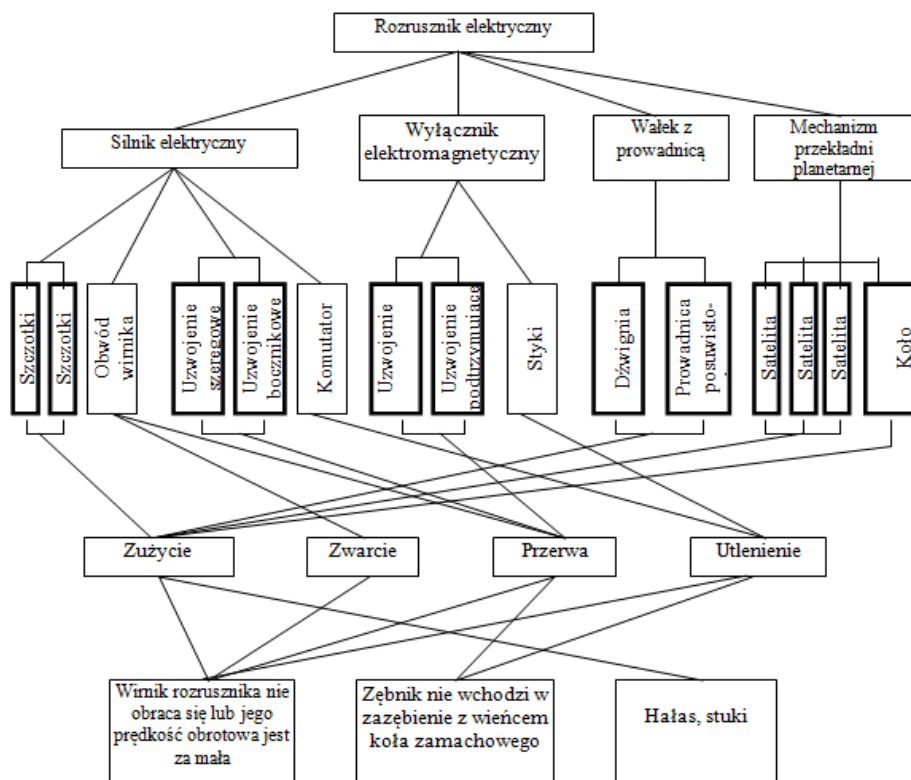
W fazie początkowej rozruchu następuje przejście silnika ze stanu spoczynku i nadanie wałowi korbowemu ruchu obrotowego. Faza zasadnicza polega na doprowadzeniu do najmniejszej prędkości obrotowej, przy której dokonuje się zapłon paliwa w cylindrach. Prędkość ta jest nazwana prędkością obrotową rozruchu i wynosi: dla silników z zapłonem iskrowym (ZI) ok. $0,66 \div 1,16$ obr/s ($40 \div 70$ obr/min), a dla silników z zapłonem samoczynnym (ZS), w zależności od ich budowy (wtrysk bezpośredni lub z komorą wstępną, z podgrzewaniem wstępnym lub bez podgrzewania), ok. $1,66 \div 3,33$ obr/s ($100 \div 200$ obr/min).

Bardzo ważnym elementem obwodu rozruchu jest akumulator. W warunkach polskich przyjmuje się, że w temperaturze -15°C obwód rozruchu powinien zapewnić silnikowi z zapłonem iskrowym (ZI) 10 rozruchów w cyklach: włączenie – 10 s, przerwa – 60 s, a silnikowi z zapłonem samoczynnym (ZS) 3 rozruchy w cyklach: włączenie – 15 s, przerwa – 60 s. Ponadto od rozrusznika wymaga się nienagannej pracy w temperaturze otoczenia $233\div 333$ K ($-40^{\circ}\text{C} \div +60^{\circ}\text{C}$).

Przy wyborze wielkości rozrusznika uwzględnia się: moment oporów i prędkość obrotową rozruchu silnika spalinowego. Gdyby rozrusznik był umieszczony bezpośrednio na wale silnika, wymiary jego i masa musiałyby być duże. Aby utrzymać wymiary rozrusznika i zasilającego go akumulatora w ekonomicznie uzasadnionych granicach, przy możliwie dużym momencie, wyposaża się go w małe koło zębate (zębnik), które sprzęga się na czas rozruchu

z uzębionym wieńcem koła zamachowego. Moment przenosi się z wałka rozrusznika na wał silnika spalinowego. Przy przełożeniach $1:8 \div 1:20$ moment rozwijany w rozruszniku jest niewielki, małe są jego wymiary i masa, co jest w sumie korzystne. Zębnik nie musi być stale sprzęgnięty z kołem zamachowym, ponieważ nie jest to konieczne ze względu na dorywczy sposób pracy rozrusznika.

W chwili, gdy silnik spalinowy zacznie pracować, zębnik powinien być jak najszybciej samoczynnie wyzębiony z wieńca koła zamachowego lub odłączony od wałka rozrusznika w sposób uniemożliwiający przekazywanie napędu z silnika do rozrusznika. Rozruszniki dzieli się wg budowy mechanizmu sprzęgającego, napięcia znamionowego, mocy znamionowej, średnicy zewnętrznej, liczby zębów zębника, modułu zębника i kierunku wirowania.



Rys. 5.1. Analiza strukturalna rozrusznika dla wybranych stanów niezdatności

5.2. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika

Silnik szeregowy prądu stałego charakteryzuje się tym, że uzwojenie wzbudzenia i uzwojenie twornika są ze sobą połączone w szereg, skąd wynika:

$$I_{tw} = I_{wzb} = I \quad (5.1)$$

Przy zmianie obciążenia zmienia się prąd płynący przez twornik i przez wzbudzenie, a jednocześnie zmienia się strumień magnetyczny wytworzony przez prąd wzbudzenia. Aby przy przepływie prądu przez uzwojenie wzbudzenia nie było nadmiernego spadku napięcia, wykonuje się je tak, aby miało małą liczbę zwojów o dużym przekroju.

Przepływ potrzebny do wytworzenia strumienia jest iloczynem prądu I płynącego przez uzwojenie wzbudzające i liczby zwojów z tego uzwojenia.

$$\theta = z \cdot I \quad (5.2)$$

Zależność prędkości obrotowej od prądu twornika otrzymuje się zgodnie ze wzorem:

$$n = \frac{U - (R_{tw} + R_w) \cdot I}{c \cdot \Phi} \quad (5.3)$$

Zakładając, że pole magnetyczne w szczelinie powietrznej jest prostopadłe do kierunku prądu twornika, moment obrotowy określa wzór:

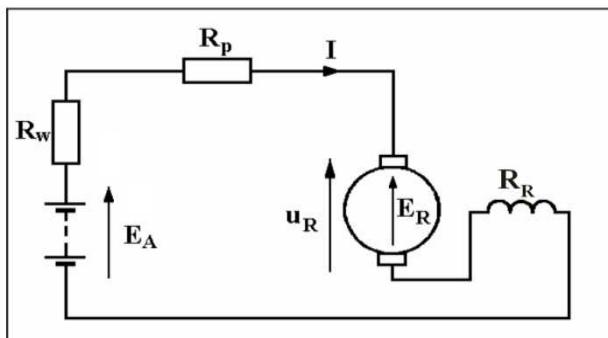
$$M = c \cdot \Phi \cdot I \quad (5.4)$$

Przy małych nasyceniach (część prostoliniowa charakterystyki magnesowania) istnieje ścisła proporcjonalność między strumieniem Φ oraz prądem I :

$$\Phi = c_1 \cdot I \quad (5.5)$$

Podstawiając tę zależność do wzoru 5.4 otrzymuje się dla małych prądów silnika

$$M = c \cdot c_1 \cdot I \cdot I = c_2 \cdot I^2 \quad (5.6)$$



Rys. 5.2. Schemat połączeń obwodu rozrusznika z zaznaczeniem charakterystycznych składowych (E_A – siła elektromotoryczna akumulatora, R_W – rezystancja wewnętrzna akumulatora, R_p – rezystancja przewodów, u_R – napięcie na rozruszniku, E_R – napięcie indukowane, R_R – rezystancja rozrusznika)

Rozruszniki samochodowe charakteryzują się:

- zasilaniem z akumulatora, a więc ze źródła o ograniczonej pojemności elektrycznej, co powoduje, że napięcie na zaciskach rozrusznika podczas pracy nie jest stałe i maleje dość znacznie ze wzrostem obciążenia;
- pracą dorywczą, podczas której temperatura uzwojeń nie przekracza wartości dopuszczalnej, a więc nie jest czynnikiem ograniczającym moc rozrusznika;
- możliwością pełnego zahamowania i pracy bez obciążeń, co odpowiada w pierwszym przypadku zerowej prędkości obrotowej i maksymalnemu momentowi w pierwszej fazie procesu rozruchu, w drugim-pracy w stanie jałowym.

Na rysunku 5.2 przedstawiono schemat połączeń obwodu rozruchu z zaznaczeniem charakterystycznych składowych. Z rysunku wynika, że napięcie U_R na zaciskach rozrusznika w stanie ustalonym można obliczyć analizując sumę spadków napięć:

$$U_R = E_A - (R_w + R_p) I \quad (5.7)$$

gdzie:

- E_A – siła elektromotoryczna akumulatora,
- R_w – rezystancja wewnętrzna akumulatora,
- R_p – rezystancja przewodów łączących rozrusznik z akumulatorem,
- I – prąd pobierany przez rozrusznik.

Napięcie indukowane wyraża się wzorem:

$$E_R = U_R - \Delta U_{SZ} - R_R \cdot I \quad (5.8)$$

gdzie:

- ΔU_{SZ} – spadek napięcia na szczotkach rozrusznika,
- R_R – rezystancja uzwojeń twornika i wzbudzenia rozrusznika.

Rozpatrując stan pełnego zahamowania ($n = 0$, $E_R = 0$) można określić wartość prądu pobieranego z akumulatora przy rozruchu (prądu zwarcowego)

$$I = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{R_w + R_p + R_R} = I_z \quad (5.9)$$

Moc rozrusznika P_e wyraża się wzorem

$$P_e = E_R I = (E_A - \Delta U_{SZ}) I - (R_w + R_p + R_R) I^2 \quad (5.10)$$

Jej wartość równa się zero w dwóch punktach: w punkcie początkowym (przy $E_R=0$ i $n=0$) oraz w punkcie pracy odpowiadającym teoretycznemu stanowi jałowemu ($I=0$).

Prąd, przy którym moc elektromagnetyczna osiąga maksymalną wartość, wyznacza się z zależności

$$I_{p_{\max}} = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{2(R_w + R_p + R_R)} = \frac{I_z}{2} \quad (5.11)$$

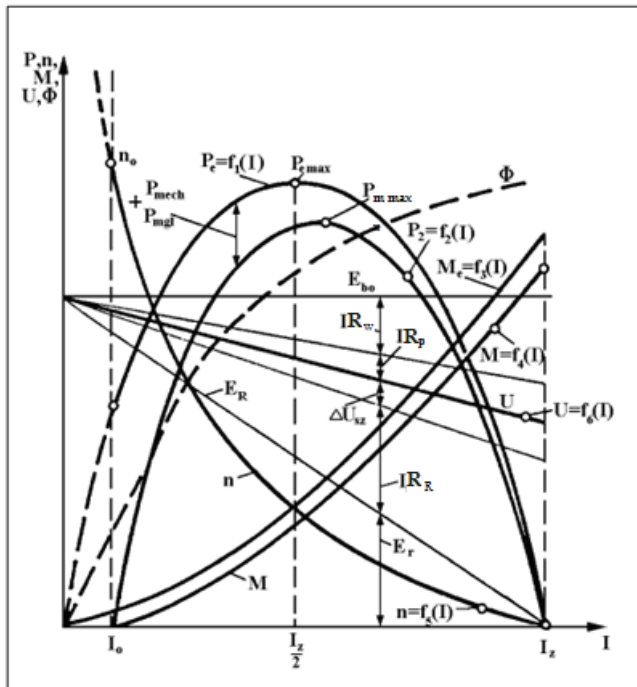
Jak wynika z zależności 5.11, moc maksymalną rozrusznik osiąga przy prądzie równym połowie prądu stanu początkowego rozruchu.

Moc maksymalną rozrusznika wyznacza się, podstawiając do zależności 5.10 prąd ze wzoru 5.11.

$$P_{e\max} = \frac{(E_A - \Delta U_{SZ})^2}{4(R_w + R_p + R_R)} \quad (5.12)$$

$$P_2 = P_e \eta_e \quad (5.13)$$

Na rysunku (5.3) przedstawiono charakterystyki rozrusznika samochodowego.



Rys. 5.3. Charakterystyki rozrusznika samochodowego:

P_e – moc elektryczna, P_m – moc mechaniczna, n – prędkość obrotowa, M – moment mechaniczny rozrusznika, M_e – moment elektromagnetyczny rozrusznika, U – napięcie, ΔU_{SZ} – spadek napięcia pod szczotkami, Φ – strumień magnetyczny, E_R – napięcie indukowane, I_0 – prąd biegu jałowego, I_z – prąd zwarcia, IR_w – spadek napięcia na akumulatorze, IR_p – spadek napięcia na przewodach zasilających rozrusznik, IR_R – spadek napięcia na rozruszniku

Moc na wale rozrusznika P_2 jest mniejsza od jego mocy elektromagnetycznej o straty mechaniczne i straty w żelazie przy czym η_e oznacza sprawność silnika elektrycznego (rozrusznika) (0,9 ÷ 0,95).

6. Model analityczny obwodu rozruchowego

6.1. Model obliczeniowy rozrusznika

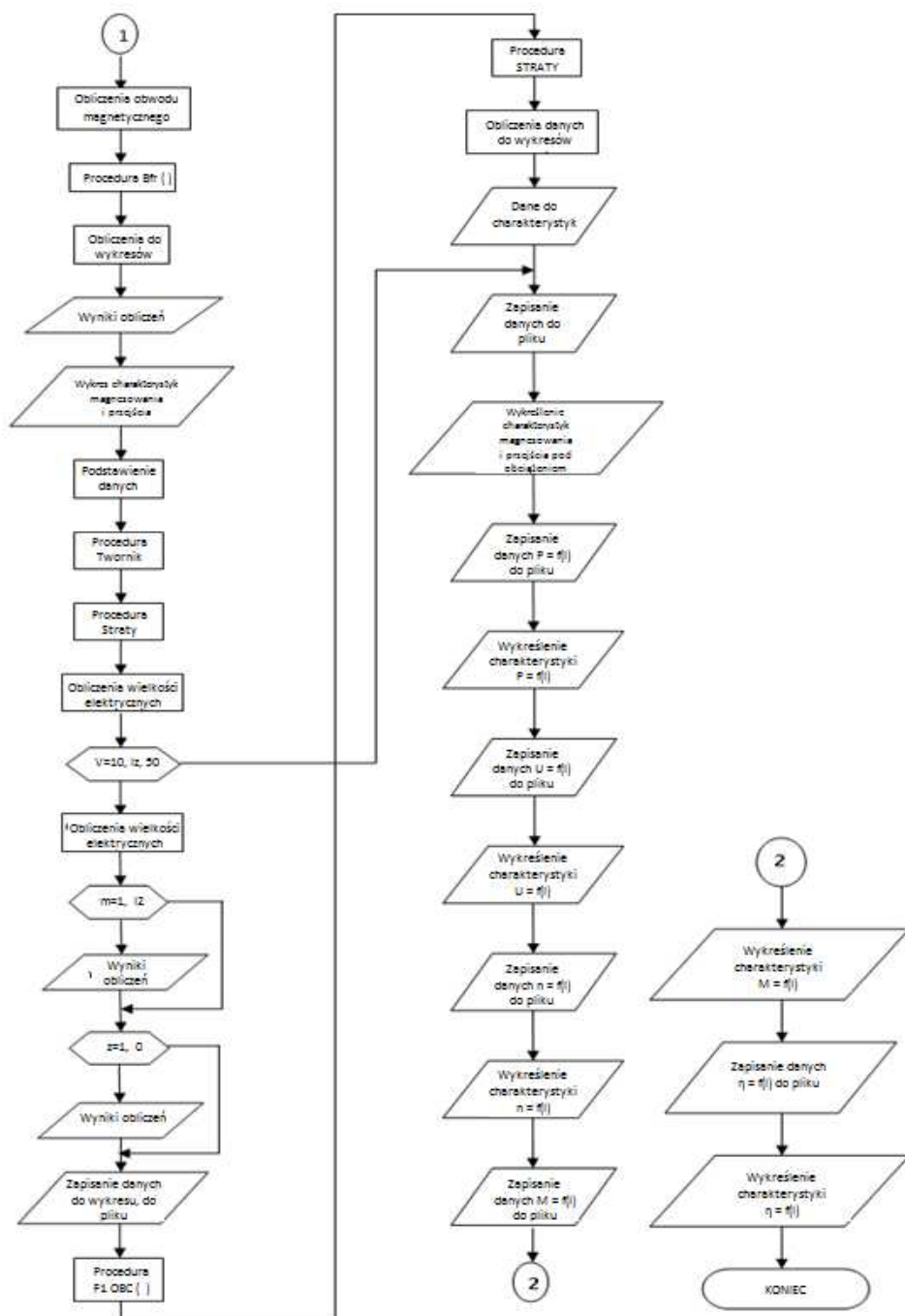
Dla symulacji uszkodzeń rozrusznika opracowano autorski program pozwalający na obliczanie oraz wykreślanie charakterystyk wybranych rozruszników, w zależności od rodzaju blach użytych na wirnik i jarzmo, oraz wybranych uszkodzeń. Program umożliwia analizowanie wpływu rodzaju blach używanych do budowy wirnika i jarzma, jak również wpływu rodzaju uszkodzenia na charakterystyki funkcjonalne rozruszników. Obliczenia, które wykonuje program, oparte są na teorii maszyn elektrycznych i maszyn elektrycznych w środkach transportu [13, 51, 178, 209, 220]. Schemat blokowy programu przedstawia rys. 6.1 i 6.2. Szczegółowy program przedstawiono w monografii [73].

Charakterystyki magnesowania blach na wirnik, jarzmo są wczytywane automatycznie przez program „rozrusznik” (rys. 6.4). Po wczytaniu tych wielkości, program realizuje obliczenia. Oznaczenia wielkości w programie „rozrusznik” przedstawia tabela 6.1.

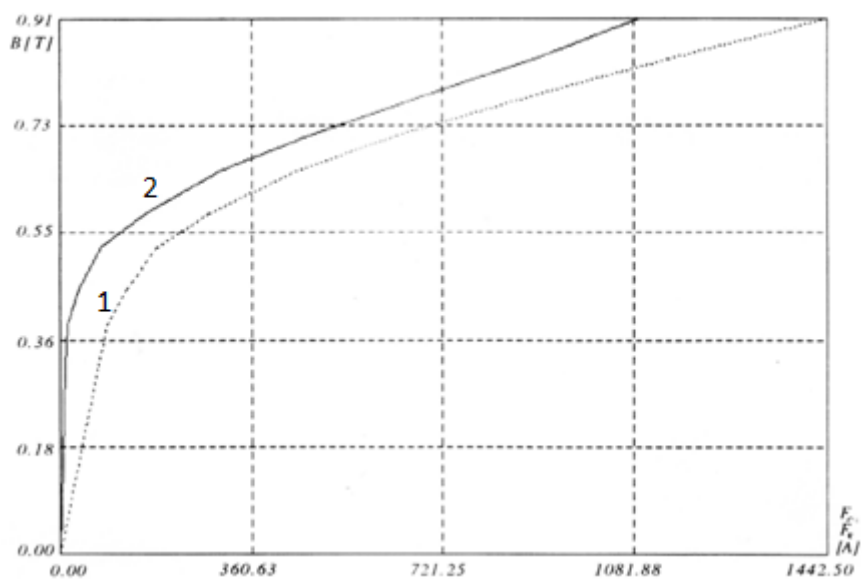
Poszczególne obliczone wielkości i ich wartości, przedstawia rys.6.5. Po obliczeniu poszczególnych wielkości, zostaje wywołana procedura graficzna, która wykreśla charakterystyki magnesowania i przejścia.

Kolejny krok, to obliczenie prądu zwarcia i charakterystyk magnesowania oraz przejścia przy obciążeniu. Na ich podstawie obliczane są wartości prądu, prędkości obrotowej, mocy, momentu i sprawności, które w dalszym etapie są wykreślane.

Po zakończeniu obliczeń procedura graficzna wykreśla charakterystyki magnesowania i przejścia przy biegu jałowym i przy obciążeniu (rys. 6.3). Wyznaczone charakterystyki są wykreślane przez procedurę graficzną (rys. 6.6, rys.6.7, rys. 6.8, rys. 6.9.) oraz zostają zapisane do odpowiedniego katalogu (:/Rozrusznik/).



Rys. 6.2. Schemat blokowy programu rozrusznik



Rys. 6.3. Charakterystyka magnesowania (1) i przejścia (2)

Tab. 6.1. Oznaczenia w programie "Rozrusznik.exe"

Pn	moc znamionowa	bzl	szerokość żłobka	kteta	współczynnik wzrostu rezystancji uzwojeń
U	napięcie baterii akumulatorów	r1	promień zaokrąglenia żłobka	Dk	średnica komutatora
etaz	zakładana sprawność silnika	Djw	wewnętrzna średnica jarzma	Lkom	długość komutatora
Rp	opór przewodów łączących akumulator z rozrusznikiem	hj	grubość jarzma	bszcz	szerokość szczotki
Bdel	indukcja magnetyczna w szczelinie przytwornikowej	bj	długość jarzma	hszcz	wysokość szczotki
kFe	współczynnik wypełnienia pakietu blach twornika	Dw	średnica wału w miejscu osadzenia blach wirnika	lszcz	długość szczotki
p	liczba par biegunów	bb	szerokość rdzenia bieguna	deltaj	szczelina przyjarzmowa
a	liczba par gałęzi równoległych twornika	hb	wysokość rdzenia bieguna	Pnsz	nacisk na szczotkę
D	zewnętrzna średnica wirnika	lb	długość rdzenia bieguna	mit	współczynnik tarcia szczotek o komutator
zlob	liczba żłobków	bn	długość łuku nabiegunnika	k1	współczynnik strat w łożyskach zależny od smaru
K	liczba wycinków komutatora	hn	wysokość nabiegunnika	DI	średnica zewnętrzna łożyska
N	liczba prętów twornika	Dn	średnica wewnętrzna rozmieszczenia nabiegunników	bPu	szerokość pręta uzwojenia wzbudzenia
l	długość twornika	lbuw	długość wewnętrznego otworu uzwojenia wzbudzenia	dPr	średnica pręta twornika
bPr	szerokość pręta twornika	bbuw	szerokość wewnętrznego otworu uzwojenia wzbudzenia	aes	liczba gałęzi równoległych uzwojenia wzbudzenia
hPr	wysokość pręta twornika	bu	szerokość uzwojenia wzbudzenia		
hzl	wysokość żłobka	ru	promień wewnętrznego zaokrąglenia uzwojenia wzbudzenia		
bozl	szerokość otwarcia żłobka	hu	wysokość uzwojenia wzbudzenia		
hozl	wysokość otwarcia żłobka	dus	spadek napięcia na szczotkach		
hz	wysokość żebra	zuw	liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia na 1 biegun		

Charakterystyki rozrusznika

Plik Wykres

Wybór rozrusznika Dane Wyniki obliczeń

Typ rozrusznika: E 100-1.5/12

Materiał bieguna i jarzma: Stal S

Materiał blach wirnika: Silnikowa zwykła

Rodzaj uszkodzenia:

Rozrusznik sprawny

Rys. 6.4. Wybór podstawowych funkcji programu

Charakterystyki rozrusznika

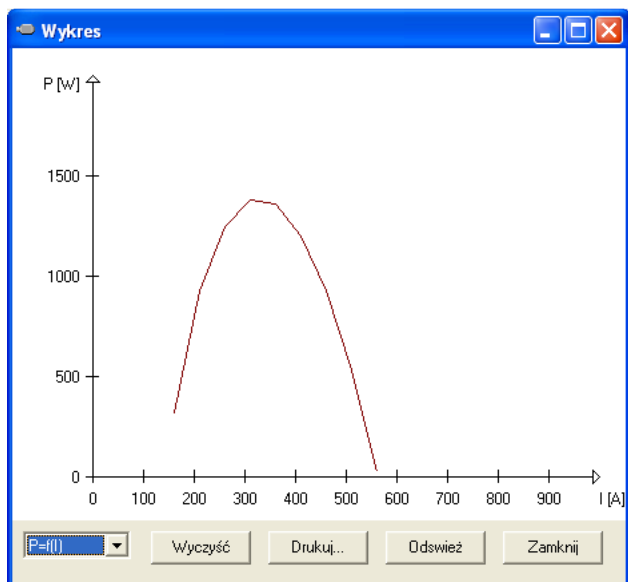
Plik Wykres

Wybór rozrusznika Dane Wyniki obliczeń

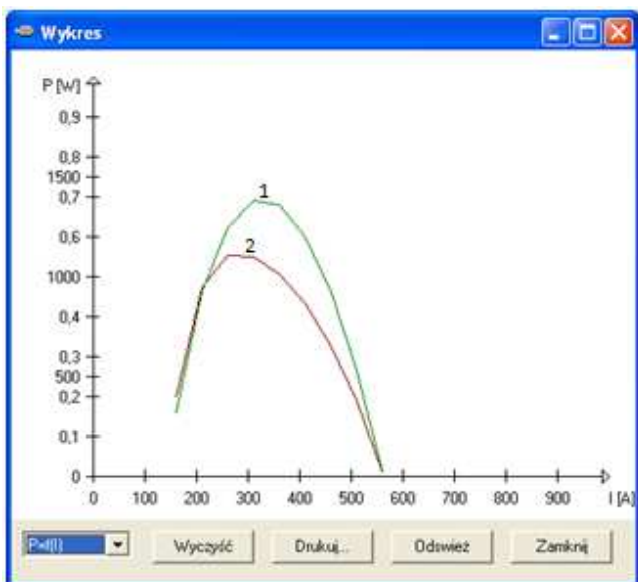
Rozrusznik

Pn=	1500 [W]	l=	0.083 [m]	bb=	0.025 [m]	kteta=	1.22 [-]	aes=	2 [-]
U=	12 [V]	bPr=	0.0018 [m]	hb=	0.0068 [m]	Dk=	0.0405 [m]		
Qbal=	60 [Ah]	hPr=	0.0036 [m]	lb=	0.08 [m]	Lkom=	0.0229 [m]		
etaz=	0.6 [-]	hzl=	0.0099 [m]	bn=	0.037 [m]	bszcz=	0.007 [m]		
Rp=	0.001 [Ohm]	bozl=	0.0015 [m]	hn=	0.0032 [m]	hszcz=	0.02 [m]		
Bdel=	0.65 [T]	hozl=	0.0006 [m]	Dn=	0.0678 [m]	lszcz=	0.016 [m]		
kFe=	0.97 [-]	hz=	0.0099 [m]	lbuw=	0.0835 [m]	deltai=	4E-5 [m]		
P=	2 [-]	bzl=	0.0032 [m]	bbuw=	0.025 [m]	pnsz=	40000 [N/m]		
a=	1 [-]	r1=	0.0016 [m]	bu=	0.0175 [m]	mit=	0.2 [-]		
D=	0.0673 [m]	Djw=	0.087 [m]	ru=	0.0015 [m]	k1=	3E-5 [-]		
Zlob=	31 [-]	hj=	0.007 [m]	hu=	0.0075 [m]	Dl=	0.0165 [m]		
K=	31 [-]	bj=	0.131 [m]	dUs=	0.3 [V]	bPu=	0.0014 [m]		
N=	62 [-]	Dw=	0.0223 [m]	zuw=	10 [-]	dPr=	0.002 [m]		

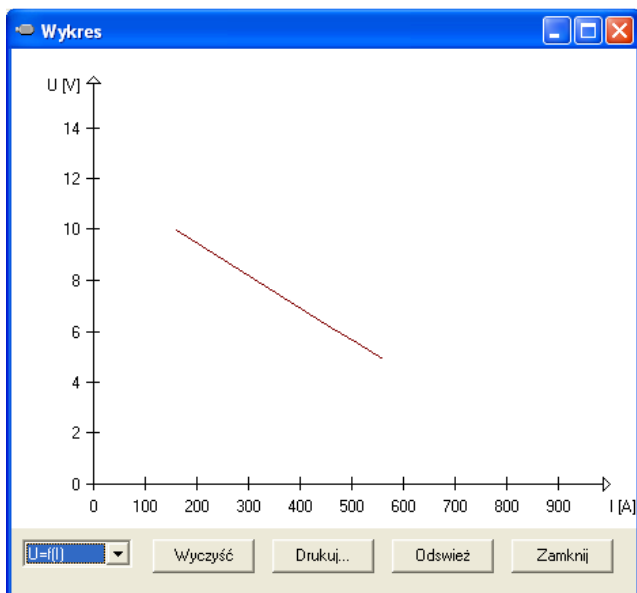
Rys. 6.5. Zestawienie danych do obliczeń rozrusznika



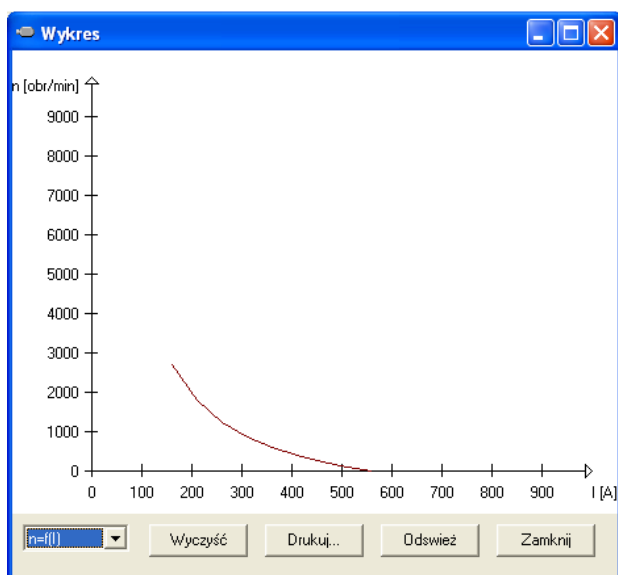
Rys. 6.6. Charakterystyka mocy rozrusznika E100



Rys. 6.7. Charakterystyka mocy rozrusznika sprawnego (1) i uszkodzonego (2)



Rys. 6.8. Charakterystyka napięcia na rozruszniku E100



Rys. 6.9. Charakterystyka prędkości obrotowej w funkcji prądu rozrusznika E100

6.2. Model charakterystyk mocy rozrusznika w programie LabView

Używając środowiska programistycznego LabView [204, 205] opracowano model odzwierciedlający charakterystyki rozrusznika:

- Mocy elektrycznej (P_e);
- Mocy mechanicznej (P_m);
- Prędkości obrotowej (n);
- Siły elektromotorycznej rozrusznika (E_R);
- Napięcia rozrusznika (U_R);
- Siły elektromotorycznej akumulatora (E_A);
- Strumienia magnetycznego (Φ);
- Momentu elektromagnetycznego (M_e);
- Momentu mechanicznego (M_m).

Przy symulacji charakterystyki mocy elektrycznej należy wprowadzić następujące dane techniczne rozrusznika:

- $I_0 = 60$ [A] – prąd biegu jałowego rozrusznika;
- $I_z = 600$ [A] – prąd zwarcia rozrusznika;
- $E_A = 13$ [V] – siła elektromotoryczna akumulatora;
- $U_{szcz} = 0,5$ [V] – spadek napięcia na szczotkach rozrusznika;
- $R_A = 0,005$ [Ω] – rezystancja akumulatora;
- $R_p = 0,005$ [Ω] – rezystancja przewodów łączących rozrusznik z akumulatorem;
- $R_R = 0,005$ [Ω] – rezystancja uzwojenia twornika i wzbudzenia rozrusznika

Program umożliwia wyznaczenie charakterystyk mocy elektrycznej, mocy mechanicznej, momentu, napięcia, prądu pobieranego przez rozrusznik.

Na rysunku 6.10 przedstawiono schemat połączeń poszczególnych bloków mocy elektrycznej (P_e), mocy mechanicznej (P_m), prędkości obrotowej (n), siły elektromotorycznej akumulatora (E_A), napięcia indukowanego w rozruszniku (E_R), napięcia na rozruszniku (U_R), strumienia magnetycznego (Φ), momentu elektrycznego (M_e), momentu mechanicznego (M_m).

Na rysunku 6.11 zestawiono charakterystyki mocy elektrycznej, mocy mechanicznej, prędkości obrotowej, siły elektromotorycznej akumulatora, napięcia indukowanego w rozruszniku, strumienia magnetycznego, napięcia rozrusznika, momentu elektrycznego, momentu mechanicznego w funkcji prądu.

Modele poszczególnych charakterystyk przedstawiono w monografii pt. „Systemy badawcze obwodu rozruchowego w środkach transportu” opracowanej przez autora [73].

7. Badania eksploatacyjne uszkodzeń rozruszników

Przy wyborze metody badań należy uwzględnić rodzaje występujących uszkodzeń:

- zwarcie uzwojeń rozrusznika,
- uszkodzenie komutatora lub szczotek,
- zła jakość połączeń elektrycznych.

W przypadku zwarcia uzwojeń rozrusznika natężenie prądu przepływającego przez rozrusznik będzie miało wartość większą niż natężenie prądu pobieranego dla sprawnego rozrusznika. Jako prąd nominalny należy przyjąć wartość natężenia prądu, przy której rozrusznik rozwija moc maksymalną; wartość tę można określić na podstawie wykresów, charakterystyk rozrusznika.

Pomiary w tym przypadku można wykonać następującymi metodami:

- metodą bezpośrednią mierząc wartość natężenia prądu rozruchu poprzez włączenie amperomierza (z bocznikiem) w obwód rozruchu (np. do końcówki biegunowej akumulatora lub pomiar bardziej wiarygodny do zacisku prądowego rozrusznika);
- metodą pośrednią polegającą na pomiarze napięcia na zaciskach akumulatora w czasie rozruchu, a następnie obciążeniu akumulatora prądem – poprzez rezystor regulowany dużej mocy – do chwili uzyskania takiej wartości napięcia na zaciskach akumulatora, jak w chwili rozruchu, i pomiarze natężenia prądu płynącego przez rezystor;

W przypadku uszkodzenia komutatora lub szczotek natężenie prądu płynącego przez rozrusznik posiada wartość mniejszą niż prąd pobierany dla sprawnego rozrusznika.

Prawidłowe wartości spadków napięcia na poszczególnych elementach obwodu rozruchowego odzwierciedlają właściwą pracę obwodu. Spadki napięcia wyznacza się na:

- połączeniach elektrycznych przewodów z masą samochodu,
- przewodach łączących poszczególne elementy obwodu,
- zaciskach styków prądowych rozrusznika,
- zaciskach biegunowych akumulatora,
- zaciskach wyłącznika akumulatora (jeżeli występuje).

Inną grupą badań rozruszników stanowią badania stanowiskowe (po wymontowaniu rozrusznika z pojazdu).

W tym przypadku zakres czynności możliwych do wykonania jest następujący:

- sprawdzenie łożysk (tulei ślizgowych), szczotek, szczotkotrzymaczy, komutatora;

- sprawdzenie wyłącznika elektromagnetycznego – kontrola podstawowa polega na sprawdzeniu działania wyłącznika przez bezpośrednie zasilanie wyłącznika elektromagnetycznego napięciem akumulatora. Próba ta powinna być uzupełniona pomiarem rezystancji uzwojeń wyłącznika, którego wynik porównuje się z danymi w dokumentacji technicznej. Niezależnie od tego, za pomocą próbnika lub omomierza sprawdza się zaciski i styki na zwarcie do obudowy. W wypadku wyłącznika elektromagnetycznego sprawdza się: stan sprężyny powrotnej rdzenia elektromagnesu, rdzeń i możliwość jego swobodnego przesuwania się wewnątrz karkasu z cewkami;
- sprawdzenie zespołu sprzęgającego – pod wpływem nacisku zespół sprzęgający powinien swobodnie przesuwać się po wałku wirnika rozrusznika (po wielowypuszczeniu). Zębnik ze sprzęgłem – przy pokręcaniu go zgodnie z kierunkiem wskazanym przez strzałkę na głowicy – powinien swobodnie obracać się bez wirnika, natomiast podczas pokręcania go w przeciwnym kierunku – łącznie z wirnikiem;
- sprawdzenie szczotkotrzymaczy – polega na kontroli izolacji szczotkotrzymaczy szczotek dodatnich względem masy rozrusznika. Podobnie jak w wypadku kontroli wyłącznika elektromagnetycznego należy sprawdzić siłę nacisku sprężyny szczotkotrzymacza (za pomocą dynamometru) i porównać wynik pomiaru z danymi technicznymi;
- sprawdzenie uzwojeń stojana na zwarcie do masy – jest to kontrola stanu izolacji przewodów uzwojeń stojana względem masy;
- sprawdzenie uzwojeń stojana na zwarcie wewnętrzne – polega na pomiarze rezystancji i porównaniu wyników pomiaru z danymi technicznymi. Ze względu na rozrzut parametrów uzwojenia należy przyjąć, że 5% różnicy między pomiarem a wskazaniem fabrycznym można uznać za wadę produkcyjną, ale jeszcze nie eliminującą uzwojeń;
- sprawdzenie uzwojenia wirnika na zwarcie z masą – jest to kontrola stanu izolacji przewodów uzwojenia wirnika względem jego masy. Przeprowadza się ją, włączając próbnik jednym końcem do masy wirnika, drugim do kolejnych wycinków komutatora. W wypadku wykrycia zwarcia wirnik należy wymienić na nowy.

Innym rodzajem badań rozruszników są badania stanowiskowe z jednoczesnym przeprowadzeniem prób na biegu jałowym oraz pod obciążeniem. Przy próbie biegu jałowego dokonuje się pomiaru prędkości obrotowej, poboru prądu i spadku napięcia na rozruszniku. Próbę przy obciążeniu przeprowadza się przy pełnym zahamowaniu wałka rozrusznika (stan zwarcia). W jej wyniku uzyskuje się wartości spadku napięcia, poboru prądu i momentu hamującego wałek. Prowadzone próby pozwalają wykryć istnienie uszkodzeń uzwojeń wirnika lub wzbudzenia oraz wykonać ocenę stanu styków połączeń wewnętrznych. Na ich podstawie można wykreślić charakterystykę badanego rozrusznika.

7.1. Analiza uszkodzeń rozruszników

W celu właściwej oceny stanu wyposażenia elektrycznego samochodu, należy ustalić kryteria uszkodzeń poszczególnych elementów. Z pośród wielu analizowanych rodzajów uszkodzeń danego elementu najczęściej występują:

- uszkodzenie zupełne – równoznaczne z pełnym zniszczeniem elementu lub utrata jego właściwości w stopniu eliminującym go z jakiegokolwiek zastosowania,
- uszkodzenie parametryczne – związane z częściową utratą właściwości charakteryzującą poszczególne parametry ograniczające stosowanie danego elementu.

Wybór kryteriów uszkodzeń (szczególnie parametrycznych) powinien uwzględniać nie tylko funkcje danego elementu, lecz również warunki pracy.

W rozprawie przedstawiono wyniki badań przyczyn reklamacji rozrusznika w okresie kilku lat. Wyniki analizy przedstawiono w postaci wykresów kolumnowych [74, 75, 134, 222–225].

Celem badań była analiza trwałości. W ujęciu liczbowym nieuszkodzalność określa się jako prawdopodobieństwo ciągłego zachowania stanu zdolności podczas wykonywania zadania.

Trwałość w ujęciu ilościowym określa się ilością wykonanej pracy, długością przebytej drogi, liczbą wykonanych cykli lub czasem w którym obiekt zachowuje określone właściwości.

Badania niezawodności wyposażenia elektrycznego samochodów mogą być prowadzone dwoma metodami analizy niezawodnościowej.

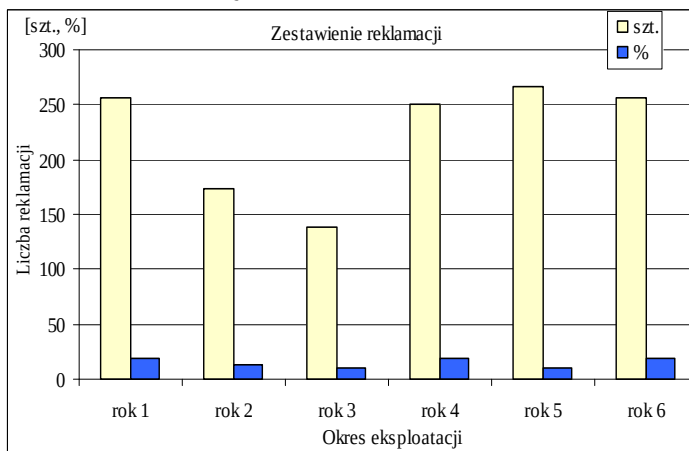
Jedną z tych metod jest metoda analityczna, która opiera się na znajomości danych o intensywności uszkodzeń obwodu rozruchu. Wymaga ona szczegółowej analizy niezawodnościowej obwodu, tj. określenia wpływu jednych uszkodzeń na inne itp.

Druga metoda jest oparta na danych z bezpośredniej obserwacji pracy elementów w czasie eksploatacji i określeniu ilości przejechanych kilometrów przez pojazd do wystąpienia uszkodzenia.

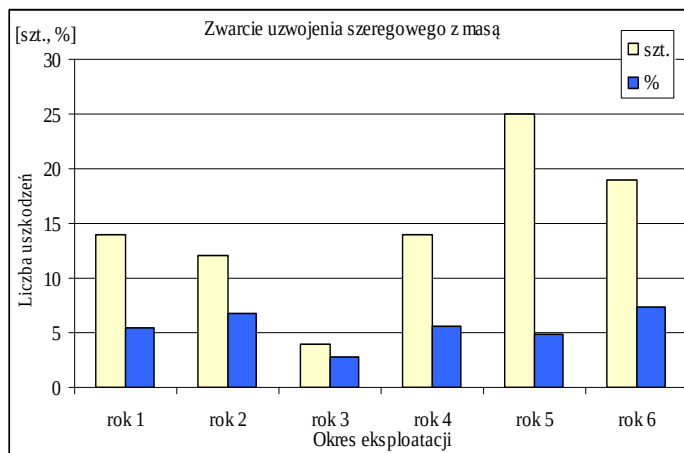
Do prowadzenia analizy uszkodzeń występujących w rozrusznikach wytypowano kilkadziesiąt ich przyczyn. Wśród nich występują:

- uszkodzenia elektryczne, jak: zwarcia i przerwy w uzwojeniach szeregowym i bocznikowym, zwarcia do masy oraz międzyzwojowe w wirniku, uszkodzenia komutatora, usterki w połączeniach lutowanych, itp.
- uszkodzenia mechaniczne, jak: wady montażu w tym niewłaściwe luzy, pęknięte elementy konstrukcyjne w tym różne uszkodzenia zębniaka oraz łożysk,
- uszkodzenia eksploatacyjne, jak zawilgocenie uzwojeń stojana i wirnika, uszkodzenia tarcz łożyskowych, wadliwe połączenia przewodów prądowych, itp.

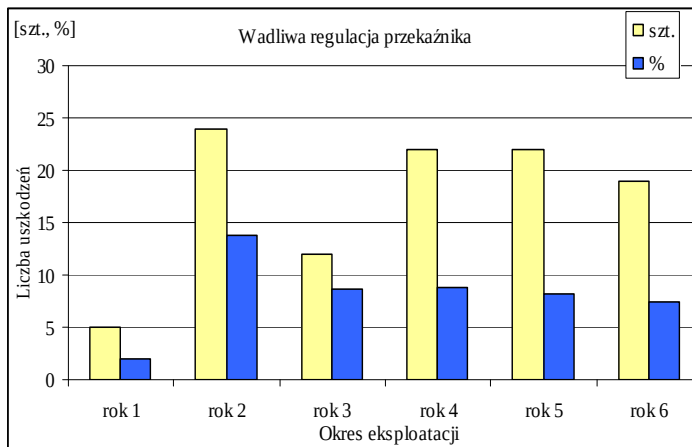
W dalszej części pracy na wykresach przedstawiono wyniki analizy przyczyn reklamacji rozruszników (rys.7.1-7.12) Uwzględniają one liczbę uszkodzeń w danym roku oraz ich procentowy udział (rys. 7.13) we wszystkich przyczynach uszkodzeń w danym roku.



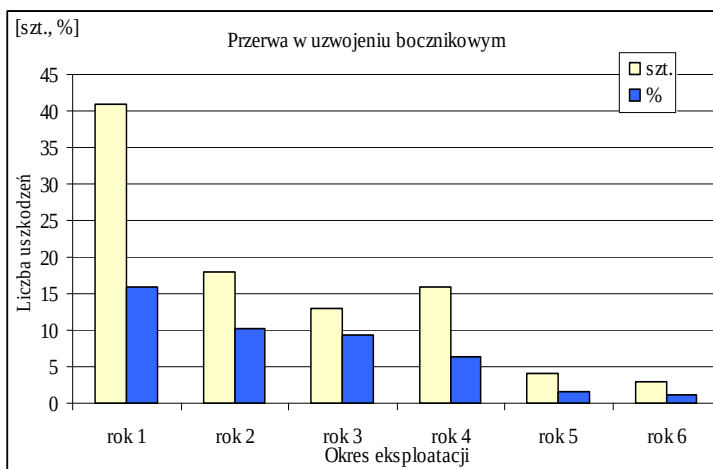
Rys. 7.1. Ogólna liczba uszkodzeń gwarancyjnych, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział w całości reklamacji



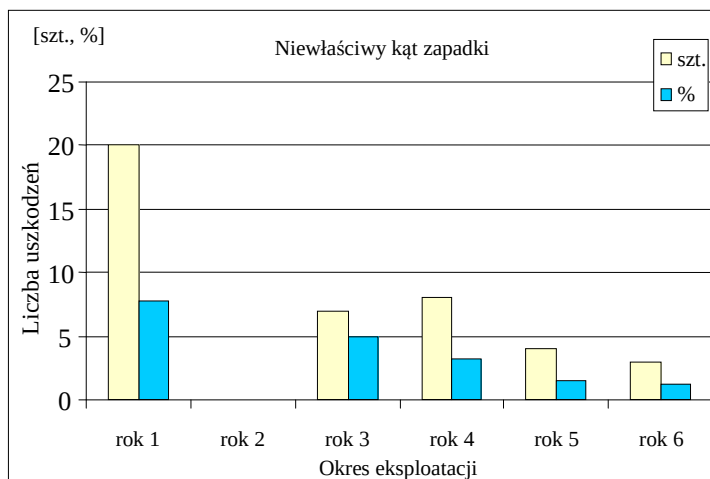
Rys. 7.2. Rozkład uszkodzeń w postaci zwarcia uzwojenia szeregowego z masą, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



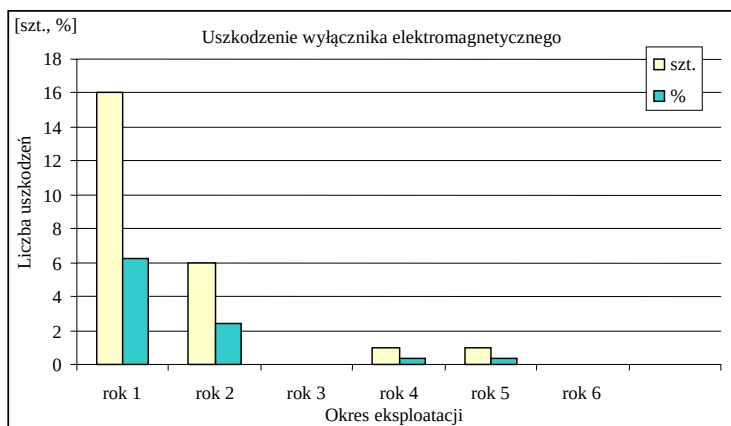
Rys. 7.3. Rozkład wadliwej regulacji przełącznika, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



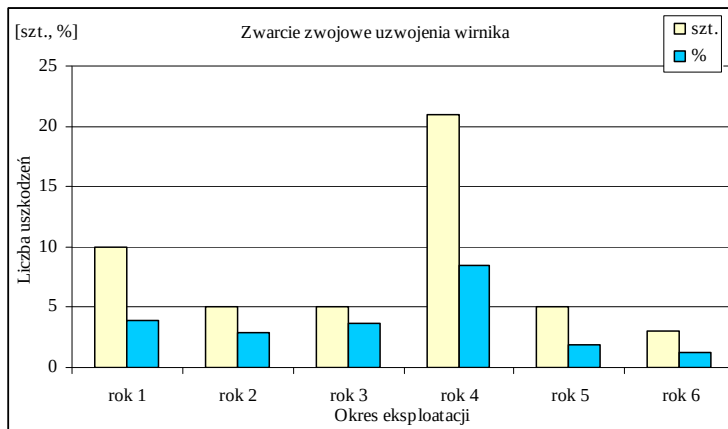
Rys. 7.4. Rozkład uszkodzeń w postaci przerw w uzwojeniu bocznikowym, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



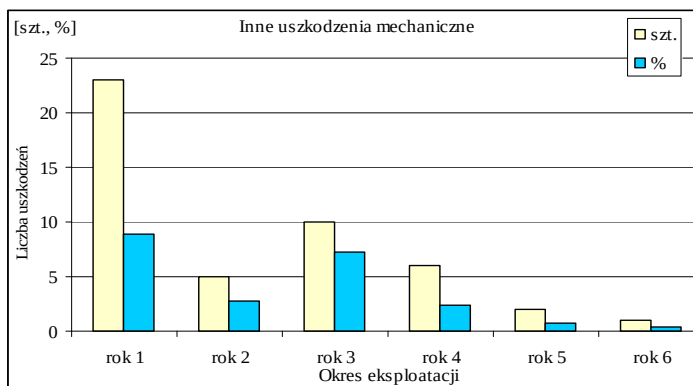
Rys. 7.5. Liczba uszkodzeń ze względu na niewłaściwy kąt zapadki, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich przyczynach uszkodzeń w danym roku analizy



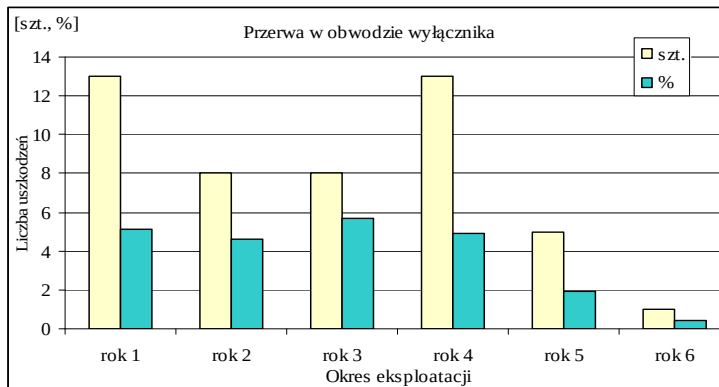
Rys. 7.6. Rozkład wystąpienia spalenia wyłącznika, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



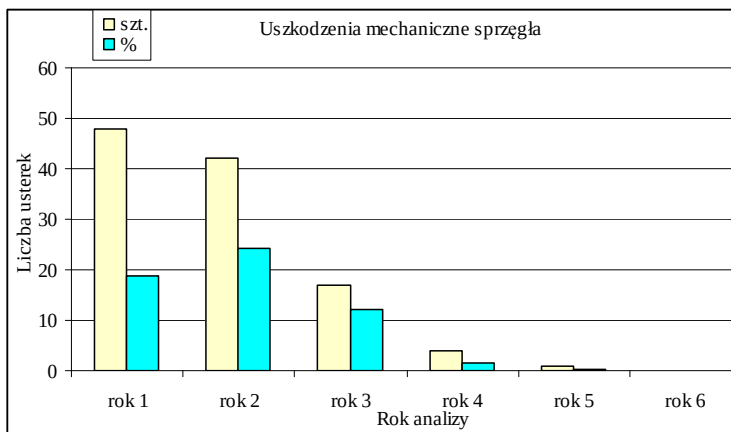
Rys. 7.7. Rozkład uszkodzeń spowodowanych zwarcie międzyzwojowym uzwojenia wirnika, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



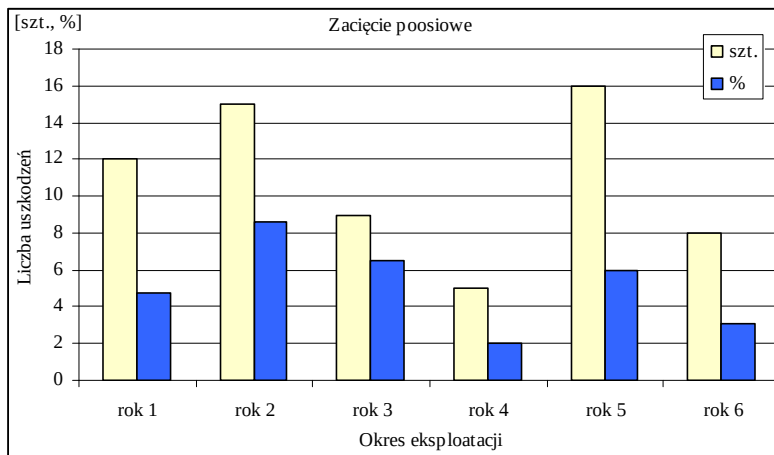
Rys. 7.8. Rozkład innych uszkodzeń mechanicznych, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



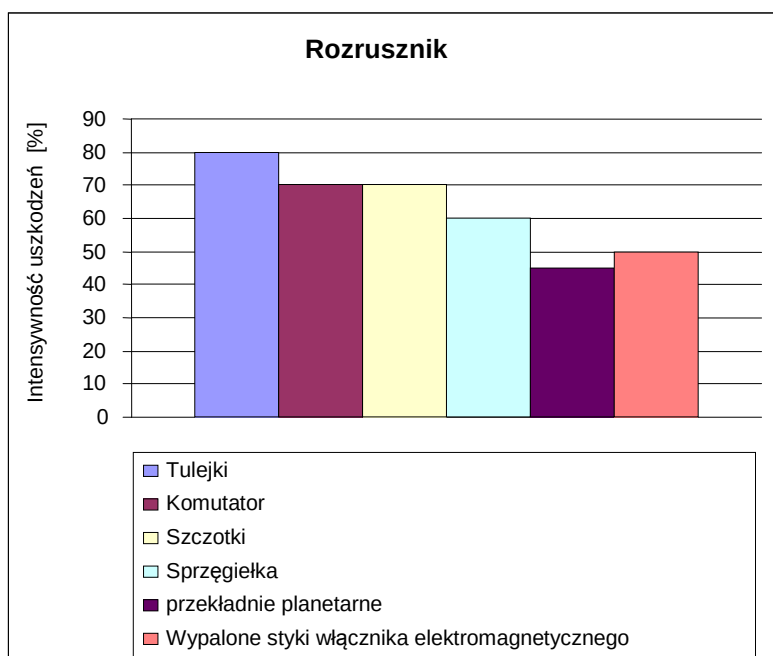
Rys. 7.9. Rozkład przerwy w obwodzie wyłącznika elektromagnetycznego, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



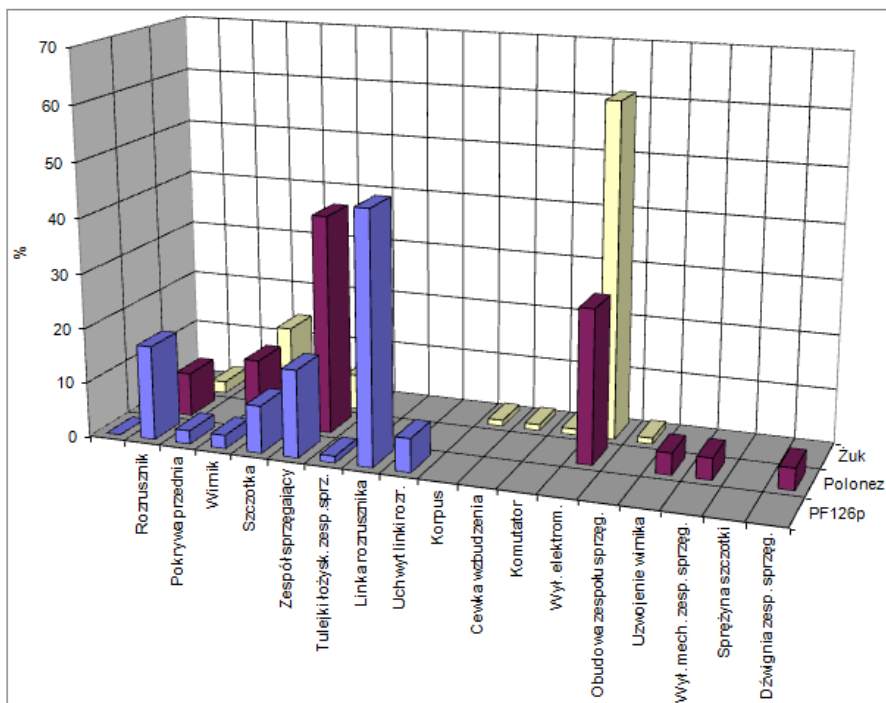
Rys. 7.10. Rozkład uszkodzeń mechanicznych sprzęgła rozrusznika, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



Rys. 7.11. Rozkład uszkodzeń spowodowanych zacięciem poosiowym zębniaka, w poszczególnych latach oraz ich procentowy udział we wszystkich uszkodzeniach w danym roku analizy



Rys. 7.12. Uszkodzenia elementów rozrusznika

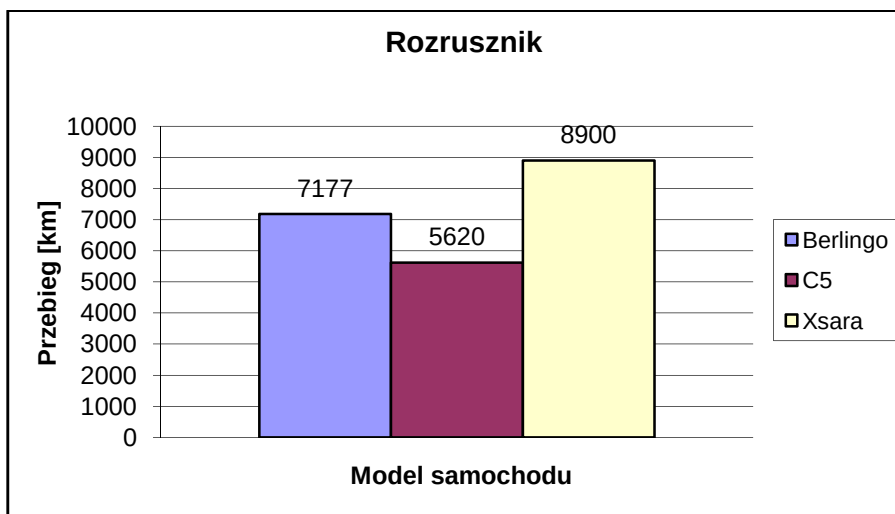


Rys. 7.13. Procentowy rozkład uszkodzeń dla elementów rozrusznika

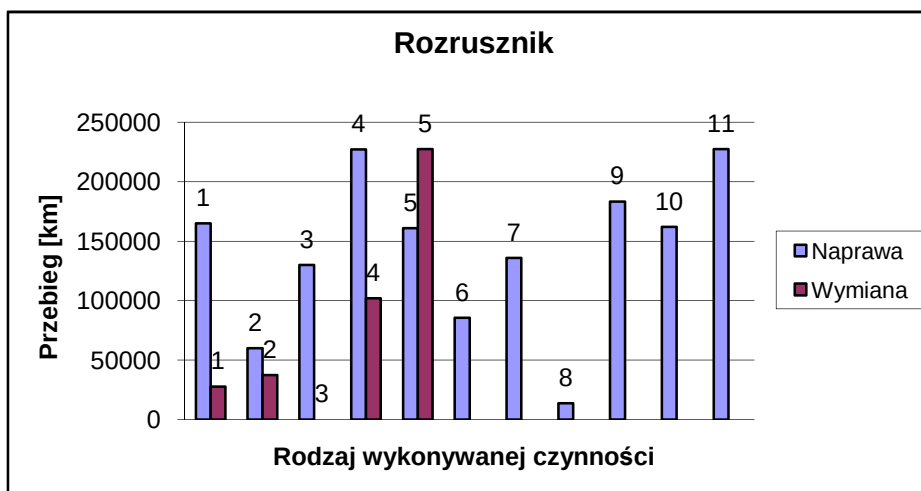
7.2. Zestawienie uszkodzeń rozruszników

Celem badań było zebranie danych o niezawodności obwodu rozruchu i ładowania. Badania przeprowadzono w firmie Bendiks w Lublinie i Warszawie oraz w serwisach samochodów osobowych (Citroen, Daewoo, Honda, Opel).

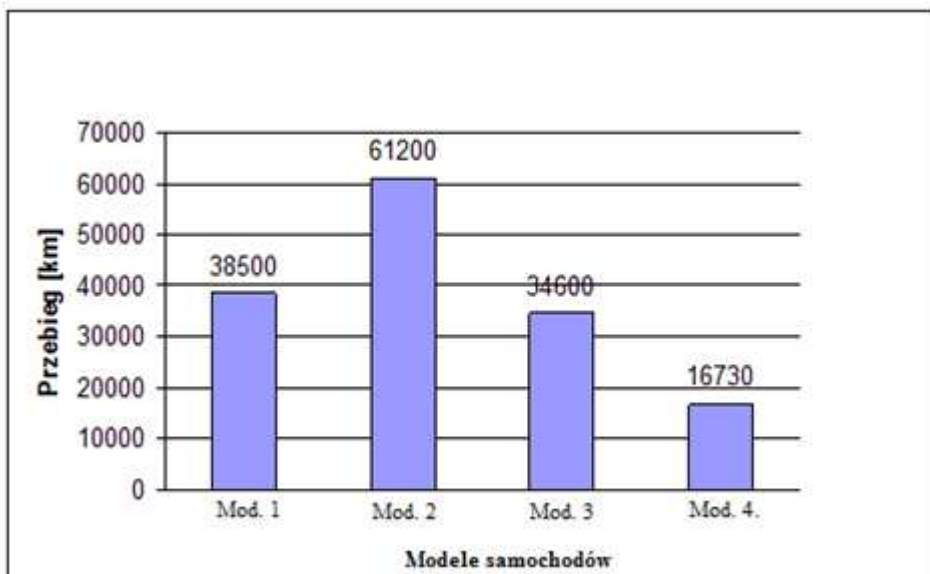
Analizę uszkodzeń występujących w rozrusznikach przeprowadzono dla czterech marek pojazdów samochodowych Citroen (Berlingo, C5, Xsara), Opel, Daewoo oraz Honda. Przebieg bezawaryjnej pracy rozruszników w okresie gwarancyjnym samochodzie Citroen przedstawia rys. 7.14. Na rys. 7.15 przedstawiono przebiegi dla jedenastu samochodów, w których przeprowadzono naprawę i naprawę z wymianą uszkodzonych elementów rozrusznika. Na rys. 7.16. przedstawiono przebiegi bezawaryjnej pracy rozruszników dla 4 modeli samochodów Daewoo. Najczęściej występujące uszkodzenia rozrusznika w samochodach Honda (rys. 7.17) dotyczyły uszkodzeń wyłącznika elektromagnetycznego oraz wyłącznika wraz z mechanizmem sprzęgającym w okresie gwarancyjnym.



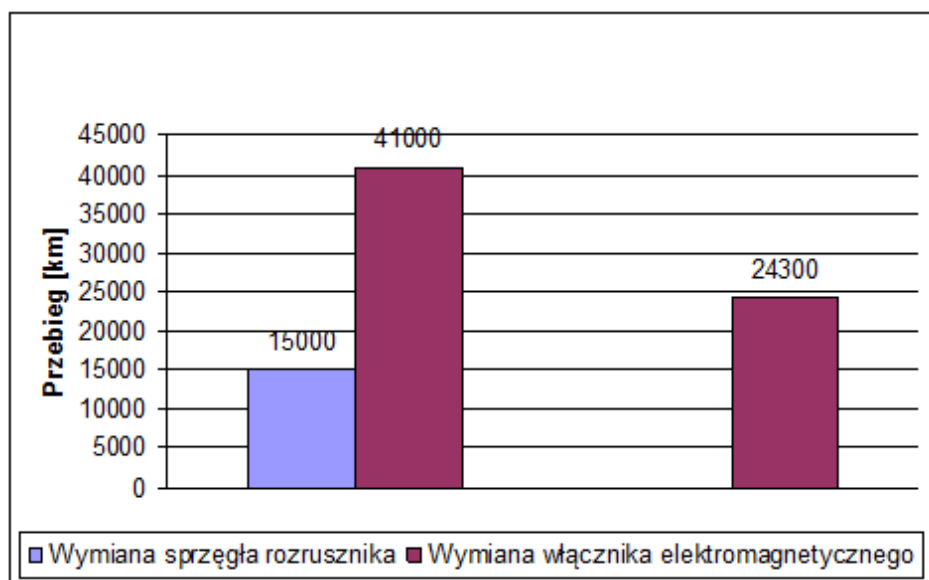
Rys. 7.14. Przebieg bezawaryjnej pracy rozruszników sam. Citroen



Rys. 7.15. Przebieg bezawaryjnej pracy rozruszników sam. Opel



Rys. 7.16. Przebieg bezawaryjnej pracy rozruszników sam. Daewoo



Rys. 7.17. Przebieg bezawaryjnej pracy rozruszników sam. Honda

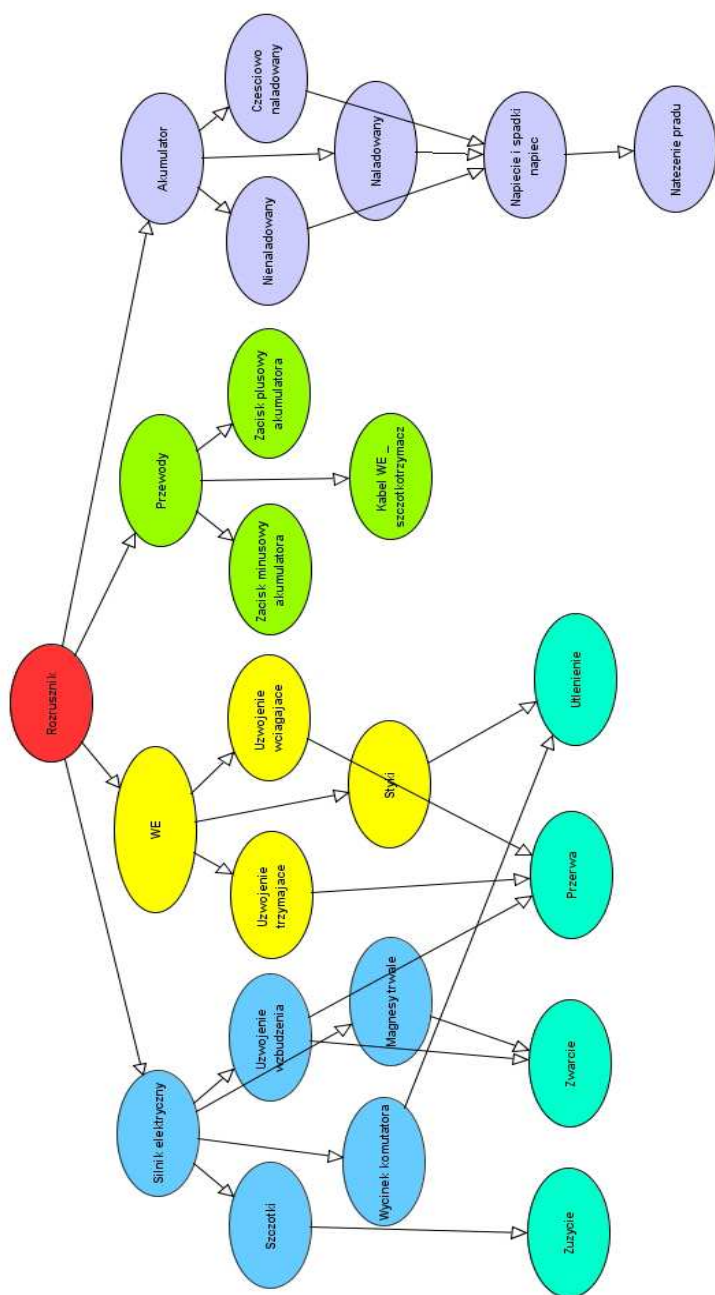
7.3. Model niezawodnościowy rozrusznika w programie AgenaRisk

Program AgenaRisk pozwala określić i porównać różne zagrożenia w sposób, który jest powtarzalny i łatwy do skontrolowania. Program obejmuje analizę, porównania, oceny i monitorowanie ryzyka na poziomie strukturalnym. Program AgenaRisk przeprowadza analizę niezawodności i umożliwia podjęcie decyzji dla:

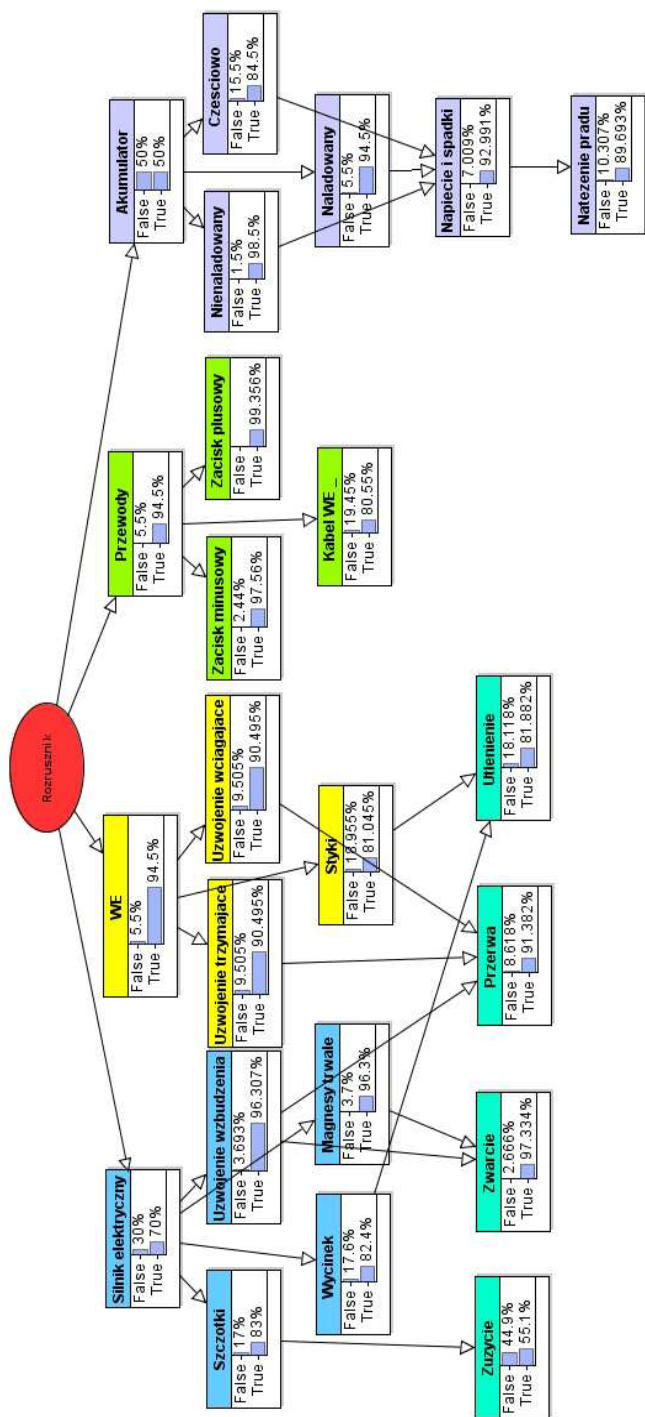
- Ryzyka operacyjnego,
- Ciągłości działania,
- Prognozowania i zapobiegania powstawaniu uszkodzeń.

Niezawodność pracy rozrusznika posiada duże znaczenie podczas jego eksploatacji. Obwód rozruchowy składa się z kilku podstawowych elementów: akumulator, rozrusznik, stacyjka, przewody bez których uruchomienie silnika jest niemożliwe. Rozrusznik odgrywa najważniejszą rolę w obwodzie elektrycznym środków transportu, w szczególności w pojazdach wojskowych, ponieważ powinien zapewnić odpowiednią prędkość obrotową w celu uruchomienia silnika.

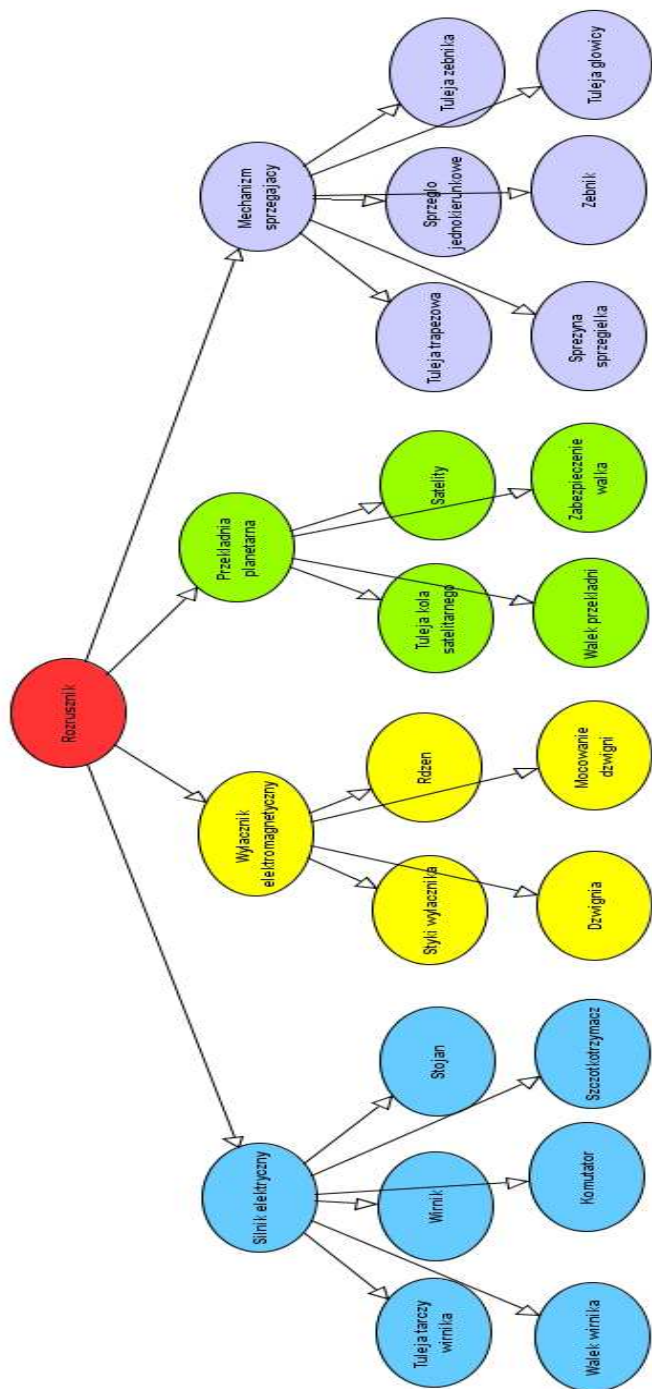
Na rysunkach 7.18 oraz 7.20 przedstawiono schemat strukturalny z podziałem na poszczególne podzespoły elementów mechanicznych i elektrycznych rozrusznika. Rysunki 7.19 i 7.21 obrazują procentowo w jakim stopniu może nastąpić zużycie każdego wymienionego elementu. Analizując schemat elektryczny można stwierdzić jakie elementy ulegają uszkodzeniom.



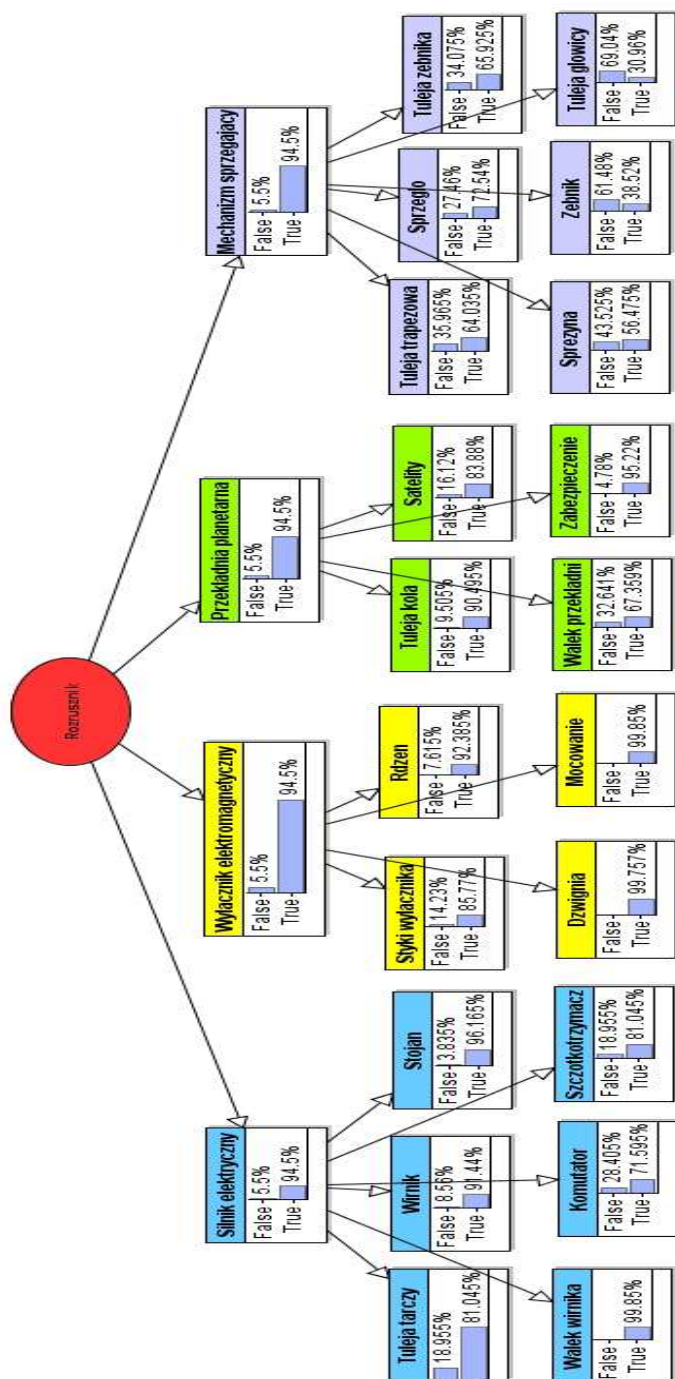
Rys. 7.18. Schemat strukturalny elementów rozrusznika z podziałem na części elektryczne



Rys. 7. 19. Schemat strukturalny elementów elektrycznych rozrusznika z uwzględnieniem procentowego zużycia poszczególnych elementów



Rys. 7.20. Schemat strukturalny elementów rozrusznika z podziałem na części mechaniczne



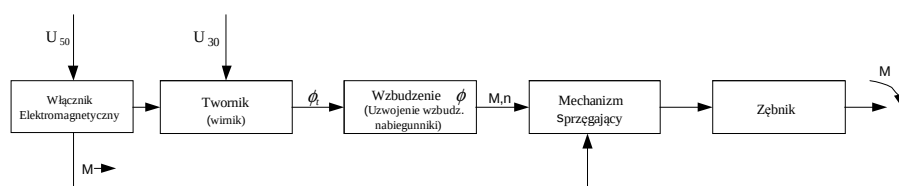
Rys. 7. 21. Schemat strukturalny elementów mechanicznych rozrusznika z uwzględnieniem procentowego zużycia poszczególnych elementów

7.4. Model niezawodnościowy nadmiarowości w rozrusznikach samochodowych

Dla zapewnienia rozrusznikowi określonych własności pozwalających na zachowanie zdolności do pracy w szerokim zakresie warunków eksploatacji, stosuje się nadmiar:

- strukturalny w wyłączniku elektromagnetycznym w postaci uzwojeń wciągającego i podtrzymującego;
- strukturalny w silniku elektrycznym w postaci uzwojeń szeregowego i bocznikowego;
- funkcjonalny przez zastosowanie prowadnicy posuwisto-obrotowej na wałku rozrusznika z dźwignią w celu zapewnienia właściwego zazębienia koła zębatego rozrusznika z wieńcem na kole zamachowym silnika spalinowego;
- parametryczny w silniku elektrycznym poprzez zastosowanie dwu par szczotek współpracujących z komutatorem;
- wytrzymałościowy przez zastosowanie przekładni planetarnej, gdzie jeden z elementów (np. koło słoneczne lub satelity) jest wykonany ze słabszego materiału;
- informacyjny przez zastosowanie w nowoczesnych obwodach rozruchowych urządzenia „start-stop”.

Schemat funkcjonalny rozrusznika przedstawiono na rys. 7.22.



Rys. 7.22. Schemat funkcjonalny rozrusznika
 U_{30} – napięcie, U_{50} – napięcie, M – moment rozrusznika

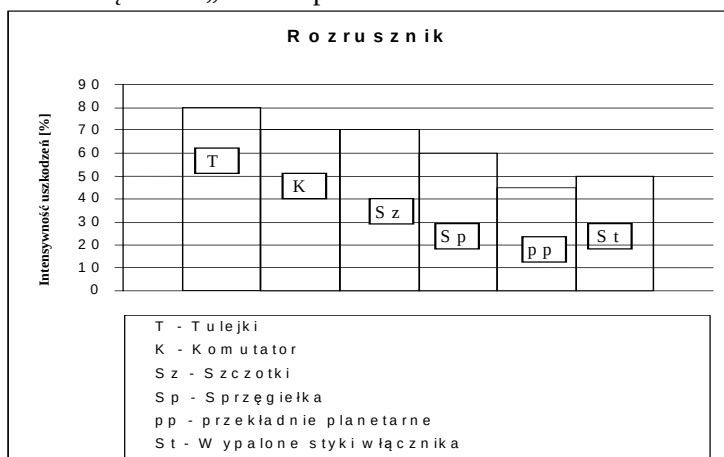
W przypadku nadmiarowości funkcjonalnej zastosowana dźwignia oraz prowadnica posuwisto-obrotowa pozwala na właściwe zazębienie się zębika rozrusznika z wieńcem koła zamachowego silnika. Zastosowanie prowadnicy posuwisto-obrotowej pozwala w fazie początkowej, dzięki sile bezwładności sprzęgła jednokierunkowego i koła zębatego rozrusznika z jednej strony, z drugiej zaś dzięki linii śrubowej prowadnicy, na przesunięcie elementu sprzęgającego i sprzęgnięcie rozrusznika z kołem zamachowym. Jednakże sprzęganie to nie zawsze jest w pełni skuteczne. Aby zadanie to było wykonane stosuje się w rozruszniku dźwignię sterowaną przez elektrowłacznik. Dźwignia ta rezerwuje zadanie pełnione przez prowadnicę i przez to uzyskuje się pewność sprzęgania rozrusznika z kołem zamachowym podczas rozruchu silnika.

Drugim rodzajem nadmiarowości zastosowanej w rozruszniku jest nadmiarowość strukturalna. Elementami rezerwowanymi w tym przypadku są uzwojenia wciągające i podtrzymujące w elektrowyłączniku, a także uzwojenia szeregowo i bocznikowe w silniku elektrycznym. Zastosowanie nadmiarowości w tym przypadku zapewnia osiągnięcie przez elektrowyłącznik skutecznego zwarcia styków obwodu elektrycznego, natomiast w przypadku silnika osiągana jest większa skuteczność działania [114, 133, 148, 169, 173, 194, 210, 234, 236].

Trzecim przykładem nadmiarowości w rozruszniku jest nadmiarowość parametryczna. Jest ona realizowana w postaci odpowiedniego połączenia szczotek współpracujących z komutatorem. W przypadku zastosowania tylko jednej pary szczotek zmienia się gęstość prądowa w stosunku do dwóch par szczotek. Dodatkowo w tym wypadku znacznie szybciej uszkodzeniu ulega komutator poprzez wypalenie jego wycinków. Przy zużyciu szczotek, w przypadku zastosowania tylko jednej pary, lub przy zawieszeniu się jednej szczotki, rozrusznik nie ma możliwości zadziałania. Poprzez zastosowanie drugiej pary szczotek, uzyskuje się wydłużony okres zdatności pracy rozrusznika samochodowego.

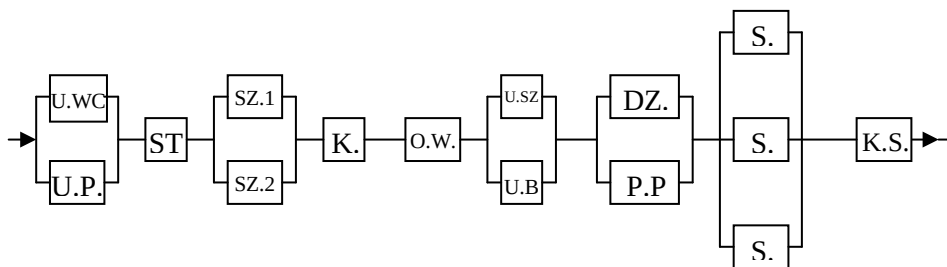
W nowej generacji rozruszników samochodowych występuje nadmiar wytrzymałościowy w celu zabezpieczenia silnika elektrycznego przed uszkodzeniem. Uzyskano to w tym przypadku poprzez współpracę satelit z kołem słonecznym przekładni planetarnej ze słabszego materiału-tworzywo sztuczne.

Kolejnym nadmiarem w obwodzie rozruchowym jest nadmiar informacyjny w stosunku do urządzenia „start-stop”.



Rys. 7.23. Uszkodzenia elementów rozrusznika

Aby określić niezawodność rozrusznika samochodowego należy rozpatrywać go jako strukturę szeregowo-równoległą (rys. 7.24).



Rys. 7.24. Zestawienie elementów rezerwowanych w rozruszniku samochodowym;
 U.WC. – uzwojenie wciągające, U.P. – uzwojenie podtrzymujące, ST. – styki,
 SZ.1 – szczotki (para 1), SZ.2 – szczotki (para 2), K. – komutator,
 O.W. – obwód wirnika, U.SZ. – uzwojenie szeregowo silnika, U.B. – uzwojenie
 bocznikowe, DZ. – dźwignia, P. P. – prowadnica posuwisto – obrotowa,
 S. – satelita, K.S. – koło słoneczne

W przypadku analizy nadmiarowości rozrusznik samochodowy stanowi w większości strukturę szeregową. Jednakże elementy rezerwowane w całym systemie są w strukturze równoległej.

W celu określenia niezawodności struktury szeregowej wykorzystuje się następującą zależność

$$R(t) = \prod_{i=1}^k R_i(t) < 1 \quad (7.1)$$

Dla wyznaczenia niezawodności struktury równoległej korzysta się z wzoru:

$$R(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - R_j(t)] \quad (7.2)$$

Sumaryczną niezawodnością całego układu szeregowo – równoległego będzie niezawodność określona wzorem:

$$R_{sr} = \{[1 - (1 - R_{U.WC.})(1 - R_{U.P.})]R_{ST}\} \cdot \{[1 - (1 - R_{SZ1})(1 - R_{SZ2})]R_K\} \cdot \\ \cdot \{R_{O.W.}(R_{U.SZ.} + R_{U.B.} - R_{U.SZ.} \cdot R_{U.B.})\} \cdot \{[1 - (1 - R_{DZ.})(1 - R_{P.P.})](1 - R_S)^3\} \cdot R_{KS} \quad (7.3)$$

7.5. Model niezawodnościowy rozrusznika

W ramach badań wyznaczono statystyczne rozkłady wybranych obwodów rozruchu i ładowania oraz statystyczne rozkłady uszkodzeń obliczone na podstawie zestawienia wyników ze stacji serwisowych. Analiza obwodów posłużyła do oceny dokładności i precyzji wykonania wyposażenia elektrycznego pojazdu. W tym celu wykorzystano test zgodności λ -Kołmogorowa.

Postawiono hipotezę zerową, że powstające usterki części elektrycznych mają rozkład wykładniczy określony dystrybuantą $F_0(x)$,

$$H_0: F(x) = F_0(x) \quad (7.4)$$

Po wyznaczeniu dystrybuanty empirycznej ($F_n(x)$) z uzyskanego rozkładu obliczana jest dystrybuita D :

$$D = \sup x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (7.5)$$

Oraz przeprowadzany jest test zgodności λ -Kolmogorowa.

$$\lambda = D\sqrt{n} \quad (7.6)$$

gdzie: n – liczność próbki.

Wartość przeciętna.

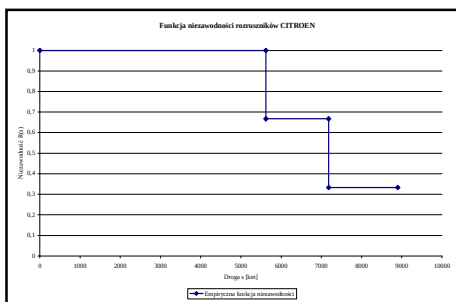
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (7.7)$$

Odchylenie standardowe:

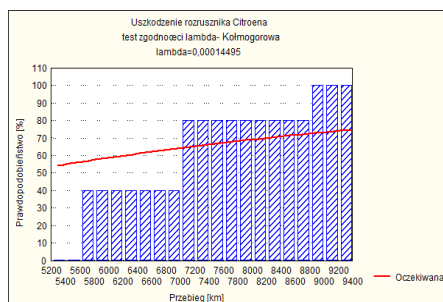
$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \quad (7.8)$$

Za pomocą programu komputerowego „Statistica” sporządzono modele niezawodnościowe elementów elektrycznych pojazdów [64–72].

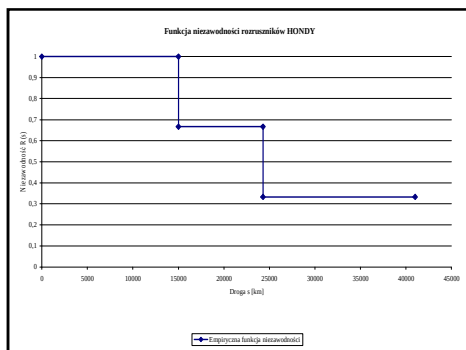
Dane do modelu niezawodnościowego otrzymane z serwisów określają przebieg samochodu do momentu wystąpienia uszkodzenia. Empiryczna funkcja niezawodności rozruszników oraz ich modele niezawodnościowe przedstawiają rysunki od 7.25 do 7.30.



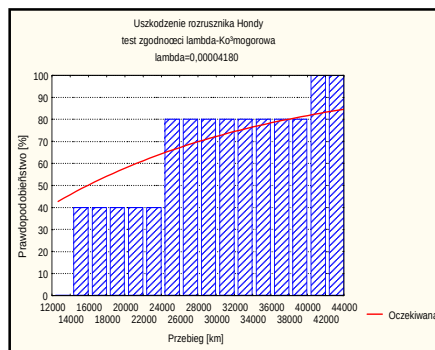
Rys. 7.25. Empiryczna funkcja niezawodności rozrusznika Citroena



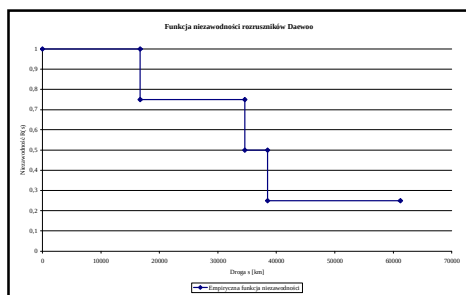
Rys. 7.26. Model niezawodności rozrusznika Citroena



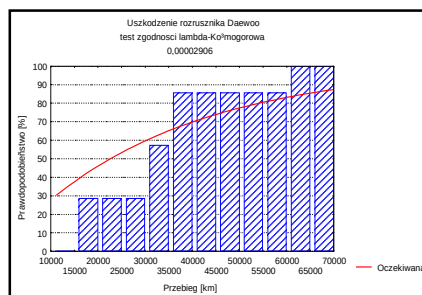
Rys. 7.27. Empiryczna funkcja niezawodności rozrusznika Hondy



Rys. 7.28. Model niezawodności rozrusznika Hondy



Rys. 7.29. Empiryczna funkcja niezawodności rozrusznika Daewoo



Rys. 7.30. Model niezawodności rozrusznika Daewoo

Analiza uszkodzeń rozruszników elektrycznych w eksploatacji pojazdów

Rozruszniki w środkach transportu eksploatowane są przy bardzo niekorzystnych i zmiennych warunkach np. różne temperatury pracy, dynamicznie zmienne obciążenie mechaniczne, a także warunki klimatyczne. W efekcie powstają różnego rodzaju uszkodzenia, które można podzielić na:

- uszkodzenia mechaniczne – uniemożliwiające poprawną pracę urządzenia, jak np. duże zmiany wymiarowe w kształcie i gładkości komutatora, nadmierne zużycie szczotek, zużycie łożysk ślizgowych i czopów wałka twornika;
- uszkodzenia elektryczne – ograniczają lub całkowicie uniemożliwiają pracę rozrusznika; są one wynikiem przeciążenia rozrusznika oraz związanego z nim przegrzania uzwojeń i uszkodzenia izolacji.

W maszynach elektrycznych pojazdów znajdują się elementy mechaniczne, w których występuje proces zużywania w wyniku tarcia, erozji oraz korozji. Sam proces tarcia szczotki o metal komutatora nie jest zbyt intensywny i przy

dobrych własnościach ślizgowych materiału szczotki dają nieduże efekty zużycia. Ubytek wagowy i liniowy szczotek oraz komutatora zwiększa się znacznie w wyniku erozji elektrycznej. Przepływ prądu ze szczotek do komutatora (jak to ma miejsce w przypadku rozrusznika) powoduje iskrzenie, tak jak wyładowania elektryczne, które przenoszą cząstki z warstwy wierzchniej zarówno szczotek, jak i komutatora. Iskreniu towarzyszy dość wysoka lokalna temperatura, która powoduje intensywne utlenianie metalu komutatora, a więc proces korozyjny. W efekcie często spotyka się obok dużego zużycia mechanicznego nadpalenie komutatora, szczególnie w przypadku zbyt dużej gęstości prądu. Zwiększająca się w wyniku erozji i korozji chropowatość komutatora i szczotek intensyfikuje wtórnie proces zużywania.

Inne współpracujące elementy rozruszników zużywają się w podobny sposób. Mniejszy jest jedynie w ich przypadku udział procesu zużycia w wyniku tarcia dzięki istnieniu zaledwie nieznacznych przemieszczeń.

Podczas eksploatacji rozrusznika następuje stopniowe zużywanie się jego elementów i podzespołów, bądź zużycie przyspieszone w wyniku nieprawidłowego użytkowania i obsługi lub pracy rozrusznika w ciężkich warunkach np. podczas częstego rozruchu silnika w okresie zimowym oraz rozruchu silnika z niedomaganiem obwodu zasilania lub obwodu zapłonowego.

Zarówno elementy mechaniczne jak i elektryczne rozruszników mogą ulegać zużyciu w wyniku eksploatacji oraz różnego rodzaju uszkodzeniom. Zużywanie się części ma natomiast charakter nagły i z reguły występuje losowo, np. po przekroczeniu granicy wytrzymałości elementu, dopuszczalnej temperatury pracy, czy też wartości przepływającego przez dany element prądu. Wynikają z tego typowe uszkodzenia elektryczne rozruszników, którymi są między innymi przerwy w uzwojeniu, zwarcia do masy, zwarcia międzyzwojowe, zaś mechaniczne to pęknięcia, wykruszenia.

Powodują one co prawda, że rozrusznik będzie pracował, jednak z wyraźnym spadkiem mocy. Zużycie komutatora może powodować iskrzenie między szczotkami a wycinkami komutatora. To z kolei prowadzi do wypalania się komutatora oraz do zwarcia pomiędzy poszczególnymi wycinkami.

Uszkodzenia elektryczne są możliwe do stwierdzenia wstępnie bez demontażu rozrusznika z pojazdu poprzez próbę rozruchu. W przypadku powstania tego typu uszkodzeń rozrusznik może nie osiągać pełnej mocy przy dość silnym iskreniu na komutatorze lub w ogóle nie dać się uruchomić. Usunięcie i zlokalizowanie przyczyny uszkodzenia w tym przypadku jest możliwe tylko po demontażu rozrusznika i na dokładnym pomiarze obwodów elektrycznych na przebiecie do masy oraz zwarcia międzyzwojowe.

Podstawową zasadą diagnozowania jakiegokolwiek obwodu w samochodzie jest sprawdzenie jego kompletności i ciągłości. W przypadku diagnozowania obwodu rozruchu należy prześledzić sprawdzany obwód od źródła zasilania (akumulatora) do odbiornika (rozrusznika) z uwzględnieniem obwodu sterowania (wyłącznik rozrusznika, ciągnio, wyłącznik rozruchu), sprawdzając, czy połą-

czenia elektryczne (realizowane poprzez złącza i nakrętki) mają ciągłość. Połączenia te mogą ulec uszkodzeniu na skutek utlenienia lub drgań w samochodzie.

Sprawdzenie rozrusznika w celu ustalenia wadliwie działających elementów można przeprowadzić przy zastosowaniu następujących metod:

- bezpośrednio w pojeździe podczas próby rozruchu oraz przy zastosowaniu podstawowych przyrządów pomiarowych,
- po demontażu rozrusznika z pojazdu i sprawdzeniu go na stanowisku laboratoryjnym.

Pierwsza metoda stosowana jest w celu ustalenia charakteru uszkodzenia. Stosuje się ją także w bieżących naprawach drogowych oraz jako czynność wstępna do ścisłej kontroli w warunkach warsztatowych. Metoda ta polega na kolejnej eliminacji z obwodu części elementów prawidłowo działających i nieuszkodzonych aż do odnalezienia źródła niesprawności obwodu.

Druga z metod jest warsztatowym przeglądem rozrusznika dla sklasyfikowania jego zużycia i ustalenia uszkodzonej części.

Właściwa eksploatacja rozrusznika wiąże się z okresowym kontrolowaniem jego stanu i usuwaniem zauważonych usterek.

7.6. Model diagnostyczny rozrusznika w programie Matlab i Matlab Simulink

Model rozrusznika opracowano na podstawie [32, 53, 59-63] teorii maszyn elektrycznych pojazdów samochodowych. Symulację zmian parametrów eksploatacyjnych przeprowadzono dla następujących zmiennych:

- $P=f(I)$ dla 3 zmiennych ΔU_{sz} (0,5 ; 1; 1,5) [V];
- $P=f(I)$ dla 3 zmiennych szczeliny przywornikowej $\delta = (0,5; 1; 1,5)$ [mm];
- $P=f(I)$ dla 3 zmiennych pojemności baterii Q_b (62, 66, 72) [Ah];
- $P=f(I)$ dla 3 zmiennych $R_p = (0,001; 0,002; 0,0028)$ [Ω].

Dane wejściowe rozrusznika R5 przedstawia tabela 7.1.

Do obliczeń wykorzystano program komputerowy Matlab będący interaktywnym środowiskiem wykorzystywanym do obliczeń oraz tworzenia symulacji komputerowych. Wyniki obliczeń w programie MATLAB przedstawia tabela 7.2. i tabela 7.3. W zakresie grafiki MATLAB umożliwił rysowanie dwuwymiarowych wykresów funkcji oraz wizualizację wyników obliczeń w postaci rysunków. Możliwe jest pobieranie danych pomiarowych z urządzenia zewnętrznego przez porty w celu ich obróbki.

Używając środowiska programistycznego Matlab opracowano model odzwierciedlający charakterystyki, rozrusznika E100 (rys. 7.31–7.34), rozrusznika R5 (rys. 7.35–7.38) oraz rozrusznika R76 (rys. 7.39–7.42) mocy elektrycznej (P) w funkcji prądu (I) podczas zmiany następujących parametrów:

- rezystancja przewodów (R_p) [Ω],
- pojemność baterii (Q_b) [Ah],
- szczelina przywornikowa (δ) [mm],
- spadek napięcia pod szczotkami (ΔU_{sz}) [V].

Tab. 7.1 Dane wejściowe rozrusznika R5

DANE WEJŚCIOWE ROZRUSZNIKA					
Dane wejściowe rozrusznika	Symbol	Wielkość	Jednostka	Do obliczeń	
moc znamionowa	P _n	1,5	kW	1500	W
napięcie znamionowe	U _b	12	V		
prędkość obrotowa silnika rozrusznika przy mocy znamionowej	n	1400	obr/min		
pojemność baterii akumulatorów	Q _b	66	Ah		
uzwojenie wirnika	faliste –				
	proste				
liczba żłobków wirnika	z	29			
liczba czynnych prętów uzwojenia wirnika	N	58			
liczba par gałęzi równoległych	a	1			
średnica pakietu wirnika	D _w	72	mm		
długość pakietu wirnika	l = l _i	66	mm	0,066	m
przekrój przewodu nawojowego uzwojenia wirnika	S _w	9,827	mm ²	0,0099	m ²
średnica zewnętrzna korpusu rozrusznika	D _{rz}	115	mm		
średnica wewnętrzna korpusu rozrusznika	D _{rw}	98	mm		
długość korpusu	l _K	119	mm		
liczba par biegunów	p	2			
wymiary nabiegunnika					
długość		60,5	mm		
szerokość		28	mm		
wysokość		9,5	mm		
grubość wąsów		3,2	mm		
uzwojenie wzbudzenia rozrusznika	szeregowo – równoległe				
ilość zwojów	Z _c	5	zwojów		
przekrój przewodu nawojowego	S _{pu} = S _s	15,7	mm ²		
rezystancja przewodów	R _p	0,002	Ω		
sprawność rozrusznika	η	0,6			
średnica wirnika	D	72	mm	0,072	m
współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej	a _i	0,7			
siła elektromotoryczna	E	8	V		
napięcie znamionowe na rozruszniku	U _n	10,10	V		
sumaryczny spadek napięcia	ΔU	2,1	V		
prąd znamionowy	I _n	247,58	A	248	A
moc elektryczna	P _w	1980	W		
wartość okładu prądowego wirnika	A	31742	A/m		
przewodność miedzi	γ _{Cu}	57*10 ⁶	S/m		
gęstość miedzi	δ _{Cu}	8,9*10 ³	kg/m ³		
spadek napięcia pod szczotkami	ΔU _{sz}	0,5	V		

Tab. 7.2. Wyniki obliczeń rozrusznika R5

WIELKOŚĆ I WYMIAR		0,2 In	0,3 In	0,4 In	0,6 In	0,8 In	1,0 In	1,2 In	1,4 In	1,6 In	I zw
1	I [A]	49,6	74,4	99,2	148,8	198,4	248,00	297,6	347,2	396,8	436,48
2	U _n [V]	11,619	11,428	11,238	10,857	10,476	10,098	9,713	9,332	8,951	8,646
3	Delta U [V]	0,350	0,525	0,700	1,050	1,400	1,751	2,101	2,451	2,801	3,081
4	E [V]	11,269	10,903	10,538	9,806	9,075	8,347	7,613	6,882	6,150	5,565
5	F = 2,5 In	124	186	248	372	496	620	744	868	992	1091,2
6	$\phi \cdot 10^{-3}$ [wb]	0,282	0,423	0,563	0,868	1,212	1,597	2,200	3,331	7,025	20,150
7	n [obr/min]	14491	9332	6781	4090	2712	1893	1253	748	317	100
8	B δ [T]	0,15	0,23	0,31	0,47	0,66	0,87	1,20	1,82	3,84	11,02
9	B δ + α i	0,1078	0,1619	0,2154	0,3323	0,4638	0,6111	0,8420	1,2750	2,6888	7,7129
10	Bz δ f [T]	0,2532	0,3804	0,5059	0,7806	1,0895	1,4356	1,9781	2,9952	6,3167	18,1193
11	B δ [T]	0,1514	0,2275	0,3025	0,4668	0,6515	0,8585	1,1828	1,7911	3,7772	10,8348
12	f [Hz]	483,03	311,07	226,03	136,33	90,40	63,10	41,77	24,93	10,57	3,33
13	Δ P _{fe} [W]	25,9	33,0	38,6	47,6	54,4	59,1	65,7	77,0	112,2	206,0
14	Δ P _m [W]	450,12	289,87	210,63	127,04	84,24	58,80	38,92	23,23	9,85	3,11
15	Δ P _{cut} [W]	10,7	24,0	42,6	96,0	170,6	266,6	383,8	522,5	682,4	825,7
16	Δ P _{cut} [W]	6,7	15,1	26,8	60,3	107,3	167,6	241,3	328,5	429,0	519,1
17	Δ P _{sz} [W]	24,8	37,2	49,6	74,4	99,2	124	148,8	173,6	198,4	218,24
18	Δ P _d [W]	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
19	Δ P [W]	533,2	414,2	383,3	420,3	530,6	691,1	893,5	1139,7	1446,8	1787,1
20	P ₁ [W]	576,30	850,27	1114,79	1615,48	2078,36	2504,24	2890,72	3240,19	3551,85	3773,96
21	P [W]	43,1	436,1	731,5	1195,1	1547,7	1813,2	1997,2	2100,4	2105,0	0,0
22	M [Nm]	0,030	0,467	1,079	2,922	5,707	9,578	15,939	28,081	66,405	0,000
23	A [A/m]	6359,12	9538,69	12718,25	19077,37	25436,50	31795,62	38154,75	44513,87	50872,99	55960,29
24	0,5*br*A [A/mm]	124,00	186,00	248,01	372,01	496,01	620,01	744,02	868,02	992,02	1091,23
25	A [A/cm]	63,59	95,39	127,18	190,77	254,36	317,96	381,55	445,14	508,73	559,60
26	P _w [W]	558,93	811,20	1045,33	1459,19	1800,51	2070,10	2265,55	2389,27	2440,45	2429,17
27	Δ P _r [W]	108,6825	69,99	50,8575	30,675	20,34	14,1975	9,3975	5,61	2,3775	0,75
28	Δ P _{msz} [W]	341,44	219,88	159,77	96,37	63,90	44,60	29,52	17,62	7,47	2,36
29	V _k [m/s]	34,1	22,0	16,0	9,6	6,4	4,5	3,0	1,8	0,7	0,2

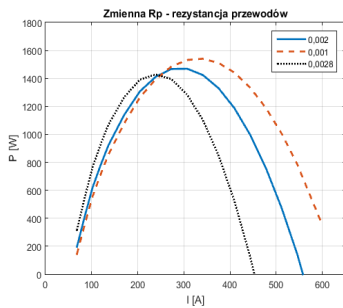
Tab. 7.3. Wyniki obliczeń rozrusznika R5

Lp.	Symbol	0,5 ϕ	0,8 ϕ	1 ϕ	1,15 ϕ	1,3 ϕ	1,5 ϕ
1	$\phi \cdot 10 - 3[Wb]$	0,798	1,277	1,597	1,836	2,076	2,395
2	$B\delta$ [T]	0,697	1,115	0,873	1,603	1,812	2,091
3	$2U_{m\delta}$ [A]	518,3	829,2	1036,5	1192,0	1347,5	1554,8
4	$B'z1=Bz1$ [T]	0,73	1,17	1,46	1,68	1,90	2,19
5	$B'z2=Bz2$ [T]	1,29	2,06	2,58	2,96	3,35	3,86
6	$B'z3$ [T]	1,76	2,81	3,51	4,04	4,57	5,27
7	$Bz3$ [T]	1,73	2,77	3,47	3,99	4,51	5,20
8	$Bzsr[T]$	0,72	1,15	1,44	1,65	1,87	2,15
9	H_{z1} [A/m]	272	445	637	892	1340	3420
10	H_{z2} [A/m]	480	1600	11500	30000	30000	30000
11	$H_{z3}[A/m]$	826	24000	30000	30000	30000	30000
12	$H_{zsr}[A/m]$	503	5141	12773	25149	25223	25570
13	$2U_{mz}$ [A]	11,97	122,35	303,99	598,54	600,32	608,57
14	Bt [T]	0,43	0,69	0,86	0,99	1,12	1,29
15	Ht [A/m]	170,50	244,00	292,00	333,00	382,50	452,00
16	U_{mt} [A]	4,5	6,5	7,7	8,8	10,1	12,0
17	Bb [T]	1,00	1,60	2,00	2,30	2,60	3,00
18	Hb [A/m]	372	797	1750	6000	16900	30000
19	$2U_{mb}$ [A]	8,2	17,5	38,5	132,0	371,8	660,0
20	$2U_{m\delta j}$ [A]	63,7	102,0	127,4	146,6	165,7	191,2
21	Bj [T]	0,69	1,11	1,39	1,59	1,80	2,08
22	Hj [A/m]	350	797	1370	3420	11500	30000
23	U_{mj} [A]	29,0	66,0	113,5	283,4	952,9	2485,8
24	$2F_m$ [V]	635,6	1143,5	1627,7	2361,3	3448,3	5512,3
25	$2F_o$ [V]	667	1201	1709	2479	3621	5788
26	U_{mp}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	F_o [V]	333,7	600,3	854,5	1239,7	1810,3	2893,9

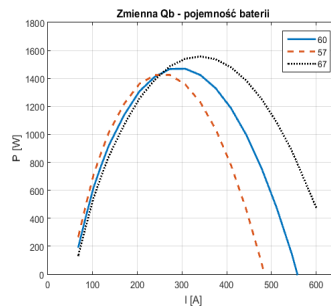
Do symulacji charakterystyk mocy elektrycznej wprowadzono następujące wartości dla rozrusznika R5:

- $P_n = 1,5$ [kW] – moc znamionowa;
- $U_b = 12$ [V] – napięcie znamionowe;
- $n = 1400$ [Obr/min] – prędkość obrotowa rozrusznika przy mocy znamionowej;
- $\Delta U_{sz} = 0,5$ (0,5;1;1,5) [V] – spadek napięcia na szczotkach rozrusznika;
- $R_p = 0,002$ (0,001; 0,002; 0,0028) [Ω] – rezystancja przewodów łączących rozrusznik z akumulatorem;
- $\delta = 0,5$ (0,5; 1; 1,5) [mm] – szczelina przytwornikowa;
- $Q_b = 66$ (62; 66, 72) [Ah] – pojemność baterii.

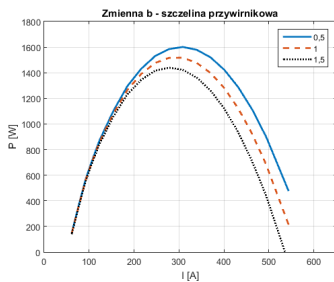
Zestawienie wyników mocy dla 3 rozruszników dla zmiennych: spadku napięcia pod szczotkami (ΔU_{sz}), pojemności baterii (Q_b), szczeliny przytwornikowej, zmiennej rezystancji przewodów (R_p) przedstawia tab. 7.4



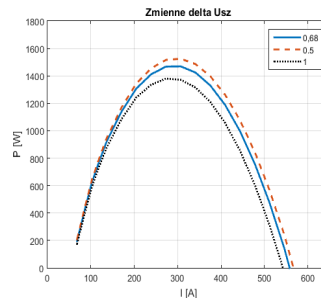
Rys. 7.31. Wpływ zmiany rezystancji przewodów na moc rozrusznika E100



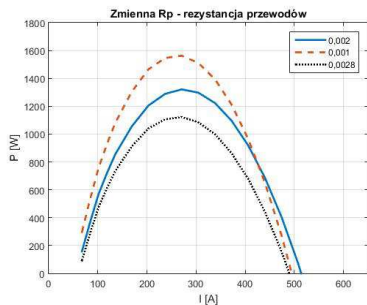
Rys. 7.32. Wpływ zmiany pojemności akumulatora na moc rozrusznika E100



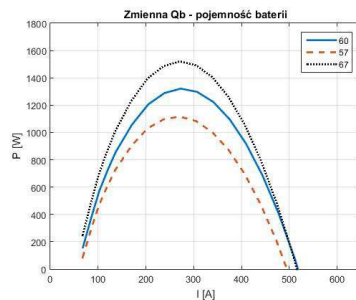
Rys. 7.33. Wpływ zmiany szczeliny powietrznej na moc rozrusznika E100



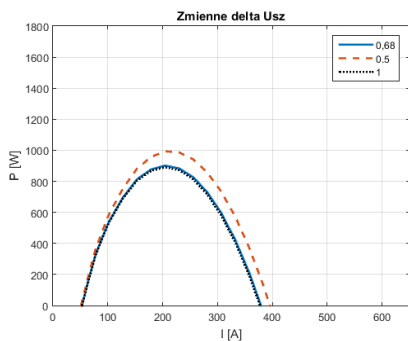
Rys. 7.34. Wpływ zmiany spadku napięcia pod szczotkami na moc rozrusznika E100



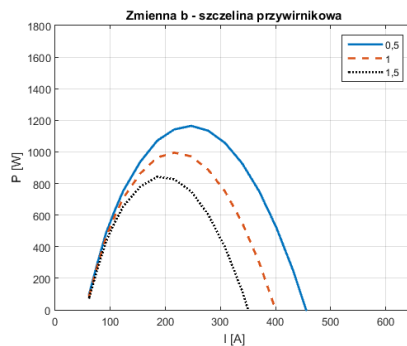
Rys. 7.35. Wpływ zmiany rezystancji przewodów na moc rozrusznika R5



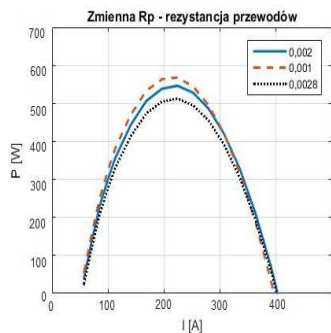
Rys. 7.36. Wpływ zmiany pojemności akumulatora na moc rozrusznika R5



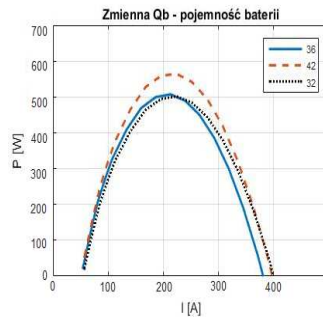
Rys. 7.37. Wpływ zmiany szczeliny powietrznej na moc rozrusznika R5



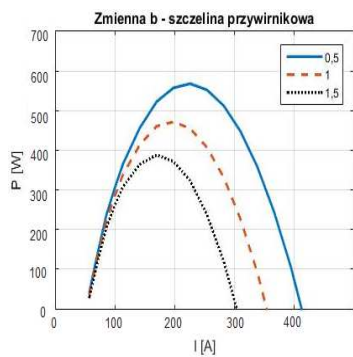
Rys. 7.38. Wpływ zmiany spadku napięcia pod szczotkami na moc rozrusznika R5



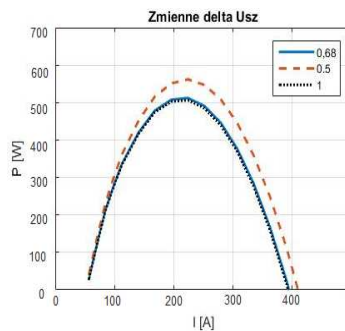
Rys. 7.39. Wpływ zmiany rezystancji przewodów na moc rozrusznika R76



Rys. 7.40. Wpływ zmiany pojemności akumulatora na moc rozrusznika R76



Rys. 7.41. Wpływ zmiany szczeliny powietrznej na moc rozrusznika R76



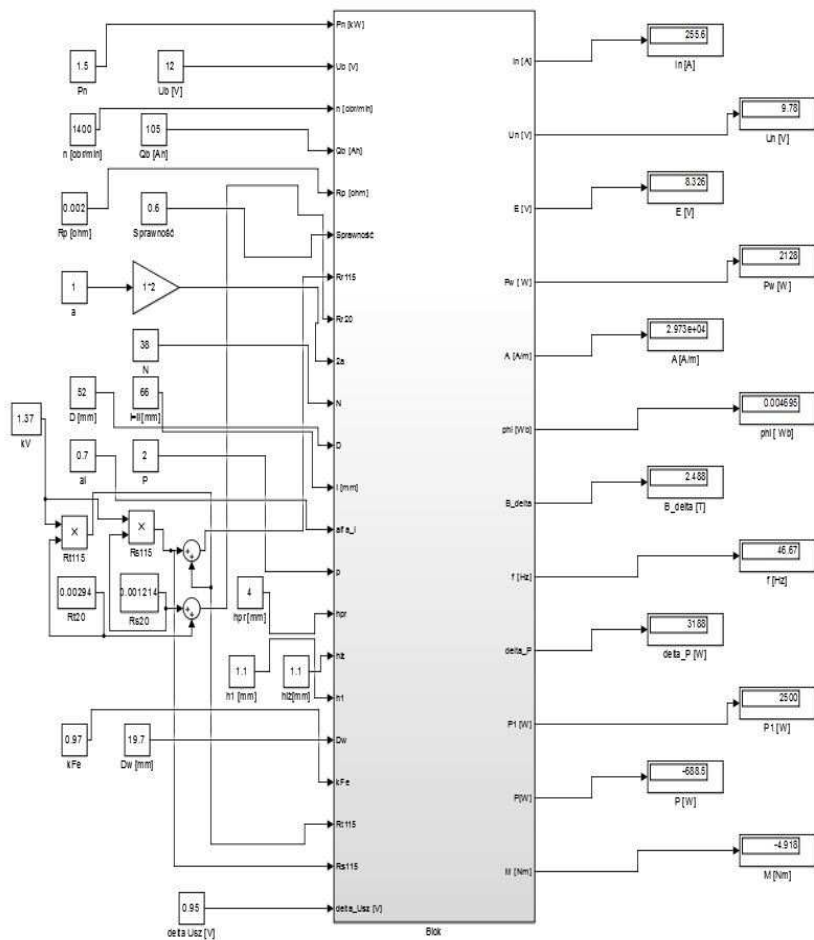
Rys. 7.42. Wpływ zmiany spadku napięcia pod szczotkami na moc rozrusznika R76

Tab.7.4. Zestawienie wyników mocy dla 3 rozruszników dla zmiennych: spadku napięcia pod szczotkami (ΔU_{sz}), pojemności baterii (Q_b), szczelinie przytwornikowej, zmiennej rezystancji przewodów (R_p)

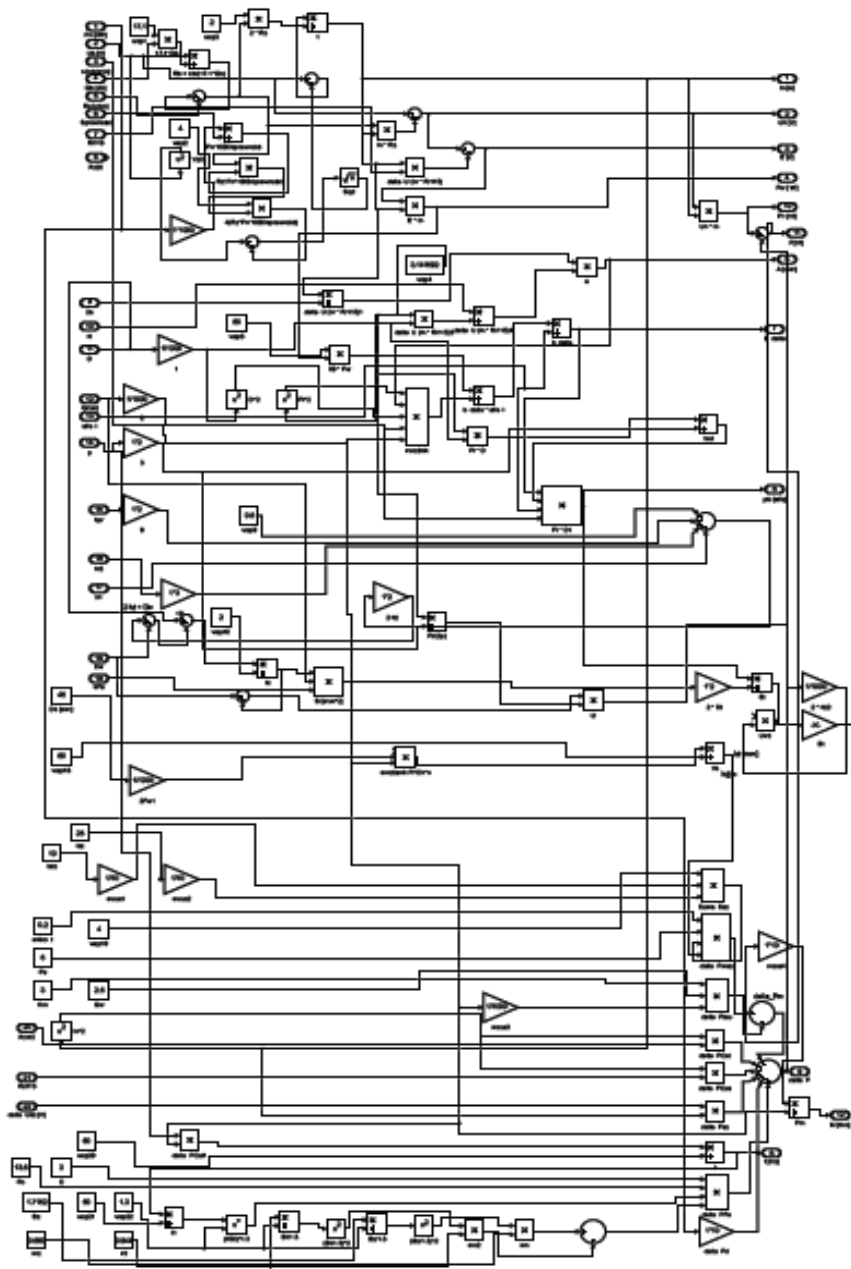
	ΔU_{sz} [V]			Q_b [Ah]			SZCZELINA [mm]			R_p [Ω]		
E100	0,5	0,68	1	57	60	67	0,5	1	1,5	0,001	0,002	0,0028
P_{el} [W]	1510	1470	1390	1420	1480	1580	1600	1500	1410	1550	1450	1410
R5	0,5	0,68	1	57	60	67	0,5	1	1,5	0,001	0,002	0,0028
P_{el} [W]	1000	900	900	1100	1300	1500	1190	1000	820	1590	1300	1100
R76	0,5	0,68	1	32	36	42	0,5	1	1,5	0,001	0,002	0,0028
P_{el} [W]	570	510	500	500	520	580	580	480	390	580	550	500

Symulację rodzaju uszkodzenia zrealizowano w programie Matlab Simulink, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 7.43. Schemat blokowy podprogramu Simulink dla rozrusznika R5 przy zmiennych parametrach eksploatacyjnych przedstawia rys. 7.44.

Zestawienie wyników symulacji dla 3 rozruszników dla zmiennych: pojemności baterii (Q_b), rezystancji przewodów (R_p) przedstawia tab. 7.5. Otrzymane wyniki symulacji uzyskano przy zasilaniu rozruszników akumulatorem o zalecanej pojemności.



Rys. 7.43. Program Matlab Simulink dla rozrusznika R5



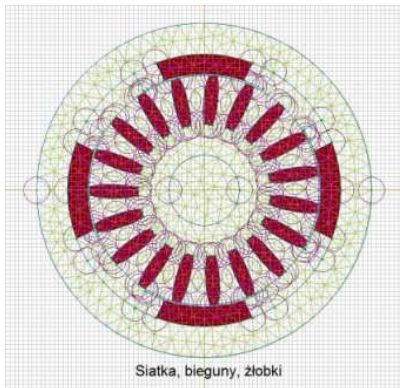
Rys. 7.44. Schemat blokowy podprogramu Simulink dla rozrusznika R5 przy zmiennych parametrach eksploatacyjnych

Tab.7.5. Wyniki badań symulacyjnych w programie Matlab Simulink dla trzech rozruszników

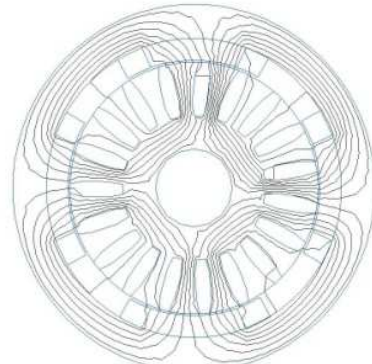
	Q_b [Ah]			R_p [Ω]		
E100	57	60	67	0,001	0,002	0,0028
I_n [A]	386,4	341,2	305,1	310	341,2	409,8
U_n [V]	6,47	7,32	8,19	8,06	7,32	6,10
B [T]	0,34	0,42	0,51	0,49	0,42	0,29
M [Nm]	9,33	10,84	11,9	11,76	10,84	8,48
P_{el} [W]	1650	1837	1970	1953	1837	1544
P_{mech} [W]	1307	1517	1666	1647	1517	1188
R5	57	60	67	0,001	0,002	0,0028
I_n [A]	386,4	341,2	305,1	326,8	341,2	–
U_n [V]	6,47	7,32	8,19	7,65	7,32	–
B [T]	0,89	1,12	1,35	1,21	1,12	–
M [Nm]	5,8	5,23	3,83	4,79	5,23	–
P_{el} [W]	1650	1837	1970	1892	1837	–
P_{mech} [W]	813,1	732,4	537,2	671,4	732,4	–
R76	32	36	42	0,001	0,002	0,0028
I_n [A]	105,5	101,9	98,44	100,6	101,9	103,1
U_n [V]	9,47	9,80	10,16	9,93	9,80	9,7
B [T]	1,22	1,34	1,43	1,46	1,34	1,17
M [Nm]	3,32	3,47	3,63	3,51	3,47	3,42
P_{el} [W]	936,6	940,8	944,9	942,4	940,8	939,5
P_{mech} [W]	466	486,3	504,2	492,1	486,3	479

7.7. Modelowanie rozkładu strumienia dla wybranych stanów eksploatacyjnych

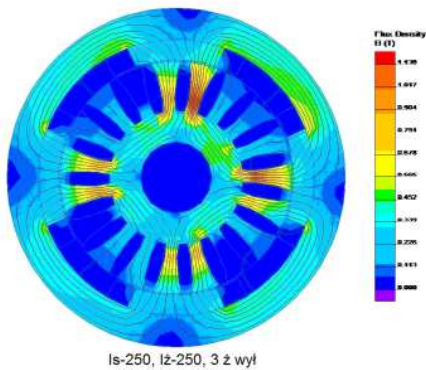
Wykorzystując program QuickField [7, 27, 28, 41–44, 80, 91-93, 97–101] przeprowadzono modelowanie rozptyłu strumienia magnetycznego i rozkładu indukcji magnetycznej dla 3 rozruszników R5, E100 i R76. Otrzymane wyniki pozwoliły przeanalizować rozkłady wielkości w poszczególnych rozrusznikach. Poza wymiarami rozruszników wprowadzono dane dotyczące rodzaju wzbudzenia (szeregowo i szeregowo-bocznikowe) oraz ilości żłobków poszczególnych rozruszników. Podstawowym parametrem dla zilustrowania rozkładu strumienia oraz rozkładu indukcji były wartości prądu w uzwojeniu wzbudzenia oraz w uzwojeniach wirnika. Wprowadzając do programu zmienną wartość szczeliny przytwornikowej oraz wyłączając dane uzwojenie symulowano przerwę w wybranym zwoju rozrusznika. Przykładowe siatki i rozkłady strumienia przedstawiono na rysunkach 7.45–7.52.



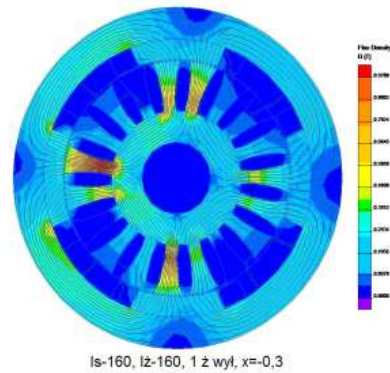
Rys. 7.45. Siatka rozrusznika R76



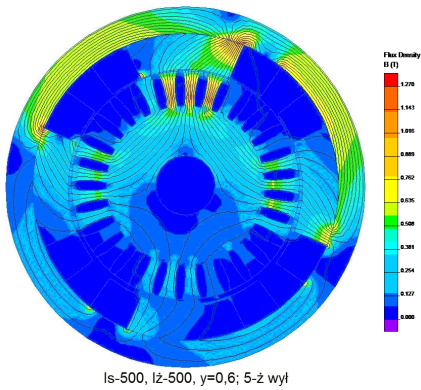
Rys. 7.46. Rozpływ strumienia magnetycznego w rozruszniku R76 dla przerwy na wycinku komutatora



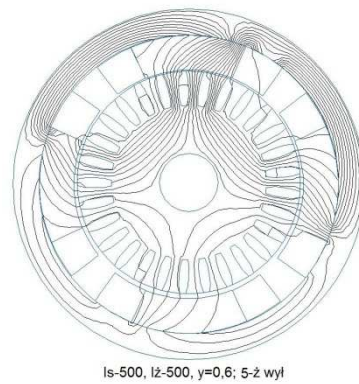
Rys. 7.47. Rozkład indukcji magnetycznej w przekroju poprzecznym rozrusznika R76 dla przerwy na wycinku komutatora



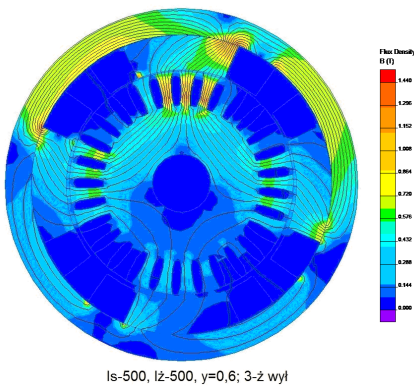
Rys. 7.48. Rozkład indukcji magnetycznej w przekroju poprzecznym rozrusznika R76 dla uszkodzonej tulejki



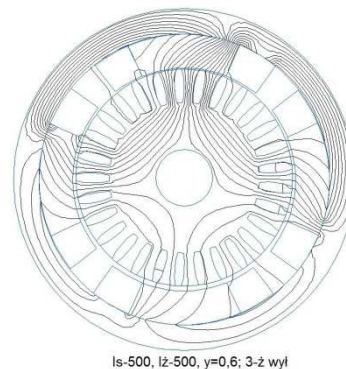
Rys. 7.49 Rozkład indukcji magnetycznej dla przerwy na dwóch wycinkach komutatora oraz zużytej tulejki rozrusznika R5



Rys. 7.50. Rozpływ strumienia magnetycznego w rozruszniku R5 dla przerwy na dwóch wycinkach komutatora oraz zużytej tulejki



Rys. 7.51. Rozkład indukcji magnetycznej dla przerwy na wycinku komutatora oraz zużytej tulejki rozrusznika R5



Rys. 7.52. Rozpływ strumienia magnetycznego w rozruszniku R5 dla przerwy na wycinku komutatora oraz zużytej tulejki

8. Eksperymentalne badania symulacyjne obwodu rozruchowego

8.1. Pomiar napięcia i poboru prądu podczas włączania rozrusznika

Badania symulacyjne przeprowadzono na stanowisku ELKON SUPER 3. Stanowisko to pozwala przeprowadzić pomiary następujących wielkości podczas hamowania:

- I – prąd pobierany przez rozrusznik podczas rozruchu i hamowania;
- U – spadek napięcia podczas rozruchu i hamowania.

Rejestracje przebiegów napięcia i prądu przeprowadzono dla sprawnego rozrusznika oraz zasymulowanych uszkodzeń:

- 1 – odłączenie uzwojenia wzbudzenia od pierwszej szczotki dodatniej
- 2 – odłączenie uzwojenia wzbudzenia od drugiej szczotki dodatniej
- 3 – przerwa w uzwojeniu wzbudzenia i uzwojeniu bocznikowym
- 4 – uszkodzenie uzwojenia bocznikowego
- 5 – brak połączenia masy ze szczotką ujemną
- 6 – zwarcie pomiędzy wycinkami komutatora
- 7 – zwarcie dwóch par wycinków komutatora
- 8 – wyładowany akumulator
- 9 – nadmierny luz tulei ślizgowej tarczy
- 10 – nadmierny luz w tulei ślizgowej głowicy
- 11 – odłączony jeden zwój od komutatora wirnika

Wykonując pomiary włączano rozrusznik i po zwłóce czasowej, czyli po osiągnięciu przez rozrusznik ustalonego stanu, hamowano rozrusznik, aż do jego całkowitego zatrzymania. W związku z powyższym czas potrzebny do wykonania tych czynności powinien mieścić się w granicach od $1,5 \div 2$ s, dlatego też czas próbkowania ustawiono na 0,2 ms.

Obiektem badań był rozrusznik E100. W celu uniknięcia błędu pomiaru, po każdym pomiarze doładowywano akumulator. Wykonano pomiary przy sprawnie działającym rozruszniku, a następnie dla jedenastu zasymulowanych uszkodzeń. Zarejestrowane wyniki zapisano w programie „Rozrusznik.exe”. Program ten jednocześnie obrabia dane wejściowe oraz kreśli charakterystyki napięcia i prądu w funkcji czasu.

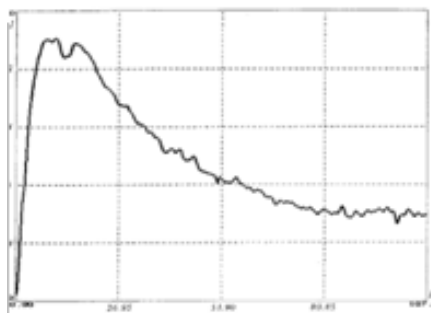
Charakterystyki dla sprawnego rozrusznika

Rysunek 8.1 przedstawia charakterystykę zmian natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik i napięcia w funkcji czasu dla sprawnie działającego rozrusznika.

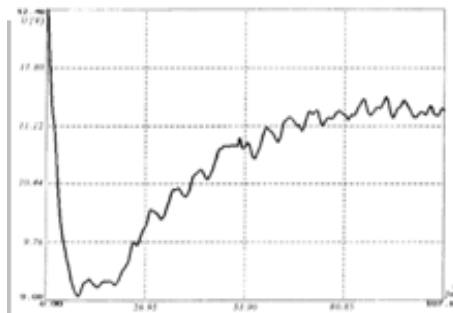
Z charakterystyki można odczytać maksymalny prąd jaki pobiera

w chwili rozruchu rozrusznik E – 100, którego wartość osiągnęła 765 A. Czas wzrostu prądu do maksymalnej wartości wyniósł 16,6 ms. Prąd po osiągnięciu ekstremum dość szybko obniżył się do wartości 252 A. Uzyskana wartość nie jest wielkością jaką posiada rozrusznik podczas pracy na biegu jałowym, gdyż jest ona znacznie niższa, a tak wysoka wartość wynika z faktu, iż była mierzona w przedziale czasowym od 0 ÷ 107,80 ms. W przedziale tym będą porównywane wszystkie charakterystyki.

Z rys. 8.2. można odczytać wartości napięcia podczas włączania rozrusznika, które obniżyło się w początkowej fazie do wartości 9,1 V, po czym wzrosło do wartości 11,3 V.



Rys. 8.1. Przebieg zmian natężenia prądu $I = f(t)$ podczas hamowania sprawnego rozrusznika



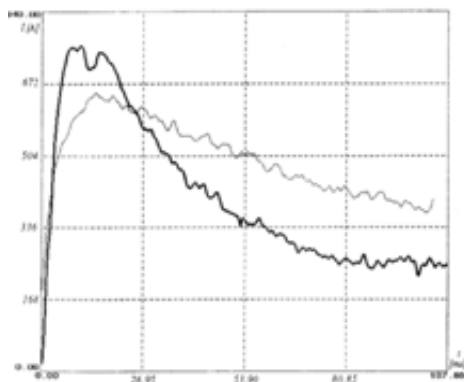
Rys. 8.2. Przebieg zmian napięcia $U = f(t)$ podczas hamowania sprawnego rozrusznika

Zasymulowane uszkodzenie 1 w postaci odłączenia uzwojenia wzbudzenia od szczotki dodatniej przy włączonym uzwojeniu szeregowym

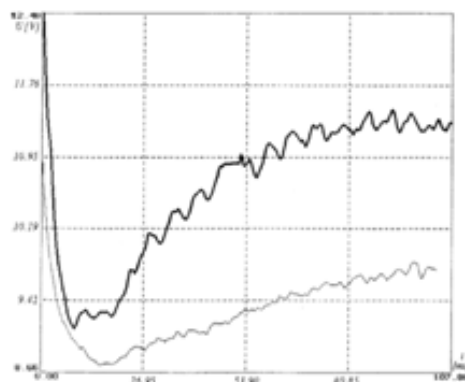
Na rys. 8.3 i 8.4 przedstawiono przebiegi prądu oraz napięcia w funkcji czasu dla uszkodzenia przy odłączonym uzwojeniu wzbudzenia od pierwszej szczotki dodatniej.

Z wykresu 8.3 odczytano maksymalną wartość prądu, która wyniosła 655 A, i była niższa od wartości prądu dla rozrusznika prawidłowo działającego. W dalszej fazie rozruchu przebieg prądu był łagodniejszy niż przy prawidłowo działającym rozrusznikiem. W końcowej fazie rozruchu, tj. po upływie 107 ms, rozrusznik osiągnął wartość 378 A, co oznacza wzrost wartości prądu o 50% w stosunku do sprawnie działającego rozrusznika.

Z wykresu 8.4 odczytana wartość napięcia osiągnęła poziom 8,6 V, tj. o 0,5 V mniej niż dla sprawnego rozrusznika. W dalszej części zauważyć można wzrost wartości napięcia, lecz nie jest on tak duży jak dla sprawnie działającego rozrusznika i osiągnął wartość 9,8 V, co oznacza, że był mniejszy o 1,5 V niż dla sprawnego rozrusznika.



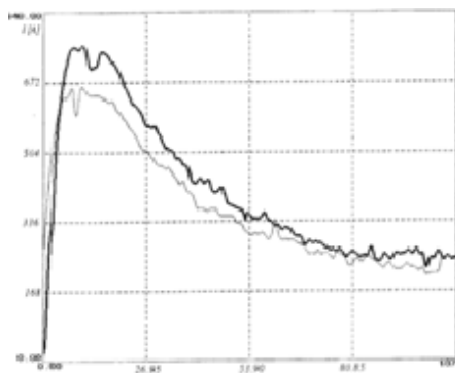
Rys. 8.3. Przebieg zmian natężenia prądu
 $I = f(t)$ przy odłączonym uzwojeniu
 wzbudzenia od pierwszej szczotki dodatniej



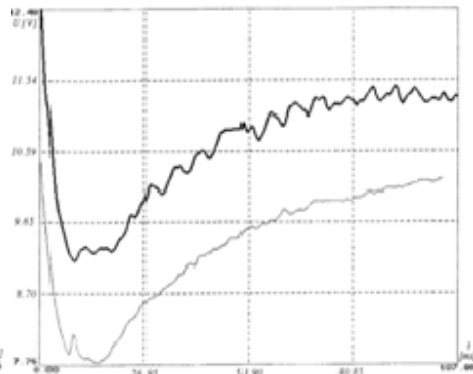
Rys. 8.4. Przebieg napięcia $U = f(t)$ przy
 odłączonym uzwojeniu wzbudzenia
 od pierwszej szczotki dodatniej

Zasymulowane uszkodzenie 2 w postaci zwarcia między wycinkami komutatora

Przebiegi dla uszkodzenia między wycinkami komutatora przedstawiają rys. 8.5 i rys. 8.6. Symulacja uszkodzenia polegała na połączeniu ze sobą dwóch wycinków komutatora (poprzez zlutowanie ich ze sobą). Prąd maksymalny jaki osiągnął rozrusznik wyniósł 657 A, po czym zmalał do wartości która była zbliżona do wartości jak przy sprawnym rozruszniku. Napięcie obniżyło się do wartości 7,8 V, czyli osiągnęło wartość mniejszą niż przy dokonywaniu wcześniejszych pomiarów i nie jest wielkością charakterystyczną przy tego typu uszkodzeniach, ponieważ zarówno w tym jak i w następnych uszkodzeniach, wartości minimalnego napięcia były ze sobą porównywalne.



Rys. 8.5. Przebieg zmian natężenia prądu $I = f(t)$ przy zwarciu wycinków komutatora



Rys. 8.6. Przebieg zmian napięcia $U = f(t)$ przy zwarciu wycinków komutatora

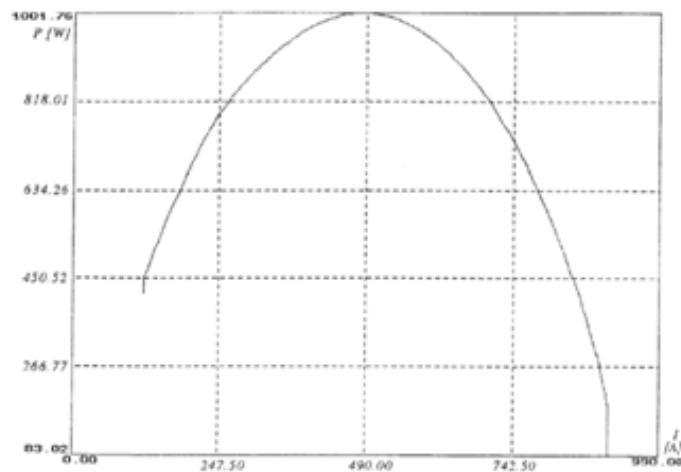
Rejestracja przebiegu prądu i napięcia podczas rozruchu rozrusznika

W celu przeprowadzenia pomiaru spadku napięcia i poboru prądu podczas hamowania rozrusznika ustalono główne parametry pomiaru, takie jak: napięcie akumulatora (12V). Rejestrowane przebiegi uzyskano podczas symulacji stanowiskowych, aproksymowano wykorzystując program „Rozrusznik.exe” i na ich podstawie wykreślono charakterystyki $I = f(t)$ oraz $U = f(t)$ podczas hamowania rozrusznika.

Rejestrację przebiegów napięcia i prądu przeprowadzono dla sprawnego rozrusznika oraz zasymulowanych uszkodzeń na podstawie których wykreślone zostały charakterystyki mocy:

Charakterystyka dla sprawnego rozrusznika

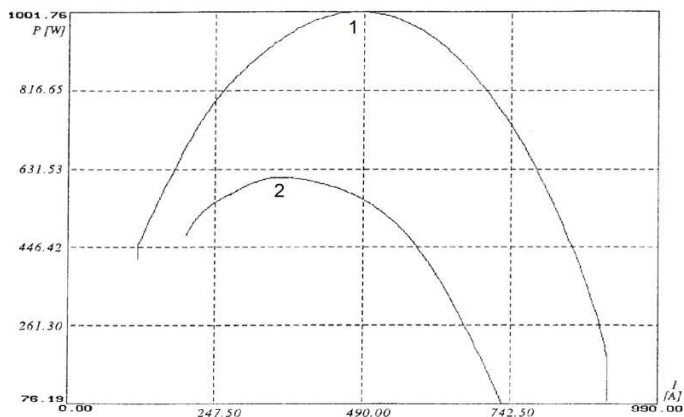
Rejestracja polegała na pomiarze napięcia oraz natężenia prądu w funkcji czasu podczas hamowania rozrusznika. Na podstawie otrzymanych wyników wykreślono charakterystyki mocy w funkcji pobieranego prądu ($P = f(I)$), wykorzystując do tego celu programu „Rozrusznik.exe”. Otrzymano wykres jako wzorcowy i przedstawiono na rys. 8.7.



Rys. 8.7. Przebieg mocy $P = f(I)$ dla rozrusznika sprawnego

Zasymulowane uszkodzenie 1 w postaci braku połączenia między uzwojeniem wzbudzenia, a pierwszą szczotką dodatnią

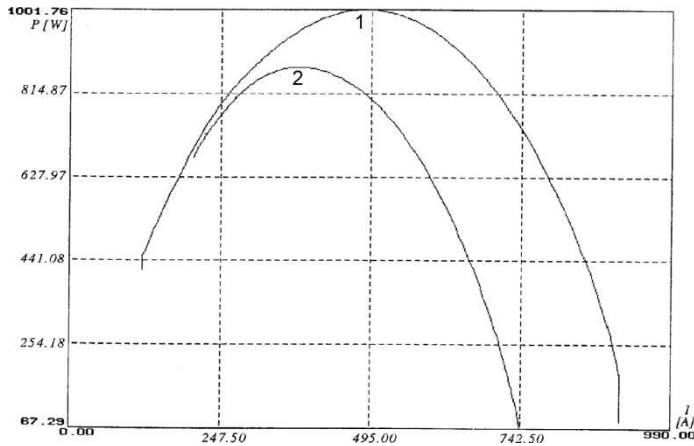
Na rys. 8.8 przedstawiono charakterystykę symulowanego uszkodzenia. Analizując otrzymane charakterystyki, można określić jaką moc osiąga rozrusznik przy danym prądzie. Z rysunku wynika, że przy tego typu uszkodzeniu moc jest znacznie mniejsza niż przy sprawnie działającym rozruszniku. Osiąga wartość 613 W przy prądzie 360 A, natomiast prąd zwarcia osiągnął 727 A.



Rys. 8.8. Przebieg mocy $P = f(I)$ dla rozrusznika sprawnego (1) i przy braku połączenia między uzwojeniem wzbudzenia, a pierwszą szczotką dodatnią (2)

Zasymulowane uszkodzenie 2 w postaci zwarcia między wycinkami komutatora

Charakterystykę dla zwarcia między wycinkami komutatora przedstawia rys.8.9. Z wykreślonej charakterystyki $P = f(I)$ wynika, że moc maksymalna jaką osiąga rozrusznik jest mniejsza niż w przypadku charakterystyki wzorcowej i wynosi 875,6 W, przy mniejszej wartości prądu, tj. 374 A. Przebieg mocy w funkcji prądu dla tego uszkodzenia jest zbliżony jak podczas uszkodzenia tulejek ślizgowych. Różnica polega na większej wartości mocy.



Rys. 8.9. Przebieg mocy $P = f(I)$ rozrusznika sprawnego (1) i dla zwarcia między wycinkami komutatora (2)

8.2. Zestawienie wyników badań

Wyniki badań otrzymane na drodze symulacji uszkodzeń na stanowisku ELKON SUPER 3, w celu porównania zestawiono w tabeli 8.1. Na podstawie otrzymanych wyników istnieje możliwość przeanalizowania, które uszkodzenia mają najbardziej niekorzystny wpływ na prawidłową pracę silnika prądu stałego, oraz mogą być przyczyną, że silnik spalinowy nie osiągnie minimalnej prędkości obrotowej, potrzebnej do rozruchu silnika spalinowego i regularnego procesu zapłonu.

Tabela 8.1. Zestawienie otrzymanych wyników badań dla rozrusznika E – 100

Rodzaj uszkodzenia rozrusznika	Faza rozruchu				Faza hamowania	
	I max [A]	I po 107 ms [A]	U min [V]	U po 107 ms [V]	P max / I [W] / [A]	I zwarcia [A]
Sprawny rozrusznik	765	252	9,1	11,3	1001,8 / 490	900
1.	655	378	8,6	9,8	613,0 / 360	727
2.	588	336	8,9	9,9	613,0 / 365	692
3.	590	361	8,9	9,9	571,8 / 360	685
4.	672	227	8,3	10,3	999,9 / 436	830
5.	705	193	8,4	10,7	862,6 / 490	834
6.	657	210	7,8	10,2	875,6 / 374	742
7.	688	252	7,8	9,7	992,6 / 415	814
8.	617	226	7,4	9,4	762,9 / 374	713
9.	655	273	7,8	9,7	843,1 / 380	762
10.	620	250	7,7	9,8	775,0 / 380	720
11.	239	139	9,5	10,6	199,6 / 128	230

Z tabeli 8.1. wynikają następujące wnioski:

1. Podczas wystąpienia uszkodzenia uzwojenia wzbudzenia, prąd maleje o 50% w porównaniu do sprawnego rozrusznika. Przy innych uszkodzeniach to zjawisko nie występuje. Moc jaką osiąga rozrusznik, jest dla tego uszkodzenia najmniejsza (nie uwzględniając uszkodzenia 11).
2. Brak połączenia masy ze szczotką ujemną, charakteryzuje największy wzrost prądu w fazie rozruchu, a następnie zmniejszenie się jego do wartości najmniejszej w porównaniu z innymi uszkodzeniami.
3. Charakterystyczne jest uszkodzenie wystąpienia przerwy w uzwojeniu bocznikowym, przy którym moc maksymalna osiąga wartość zbliżoną do wartości dla sprawnego rozrusznika. W tym przypadku błędem jest określenie uszkodzenia poprzez pomiar prądu rozruchu.
4. Charakterystyki $I = f(t)$ oraz $U = f(t)$ przy zwarcu wycinków komutatora są zbliżone do charakterystyk przy nadmiernym zużyciu tulejek ślizgowych. Aby określić, który rodzaj uszkodzenia występuje, należy porównać moc maksymalną rozwijaną przez rozrusznik. Przy uszkodzeniu wycinków komutatora moc jest znacznie większa, niż przy zużytych tulejkach ślizgowych.
5. Odłączenie jednego zwoju od komutatora wirnika powoduje że charakterystyki prądu i napięcia w funkcji czasu oraz mocy w funkcji prądu, są inne niż pozostałe. Prąd maksymalny przy takim uszkodzeniu osiąga wartość około 30% $I_{\max}$ dla sprawnego rozrusznika, natomiast moc maksymalna stanowi 20% $P_{\max}$ sprawnego rozrusznika.

8.3. Pomiar indukcji magnetycznej poprzez rejestrację napięcia Halla w szczelinie przytwornikowej rozrusznika R76 i R5

W celu rejestracji przebiegów napięcia Halla na rozruszniku R76 obiekt badań przygotowano wykonując wirnik o wydłużonym wałku (rys. 8.10.), na którym umocowano cztery pierścienie umożliwiające zasilanie hallotronu oraz odbiór sygnału napięcia Halla [37, 165].



Rys. 8.10. Widok rozrusznika R76 z wyprowadzeniami z czujników hallotronowych

Drugi czujnik hallotronowy umieszczony został na nabiegunniku stojana (rys. 8.11). W rozruszniku R5 podobnie naklejono hallotron na nabiegunniku. Rejestracje napięcia Halla przeprowadzono zasilając hallotроны napięciem stabilizowanym uwzględniając kompensację napięciową i częstotliwościową. Sygnał z hallotyonu podawany był na wzmacniacz operacyjny, wyniki zostały zarejestrowane i przedstawione na rysunkach 8.15–8.31.



Rys. 8.11. Czujnik hallotronowy zamontowany na rdzeniu stojana rozrusznika E100



Rys. 8.12. Czujnik hallotronowy umieszczony na nabiegunkniku rozrusznika



Rys. 8.13. Czujnik hallotronowy umieszczony na wirniku rozrusznika



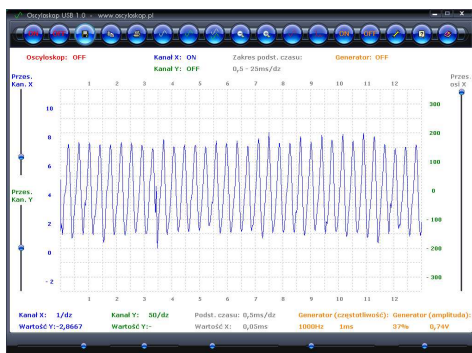
Rys. 8.14. Rozrusznik R5 z czujnikiem Halla

8.3.1. Oscylogramy przebiegu napięcia Halla dla rozrusznika R76, hallotron umieszczony na wirniku

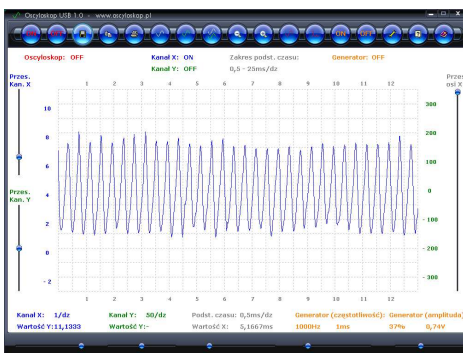
Rejestracja przebiegów napięcia Halla w rozruszniku dla hallotronu umieszczonego na wirniku przeprowadzona została dla następujących stanów:

1. $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika, bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45Ah (rys. 8.15) i 36Ah (rys. 8.16);
2. $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika, bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45Ah (rys. 8.17) i 36 Ah (rys. 8.18) (zwiększone ΔU_{Sz});
3. $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia, akumulator 36 Ah (rys. 8.19.), stan naładowania 60% (zwiększone ΔU_{Sz});

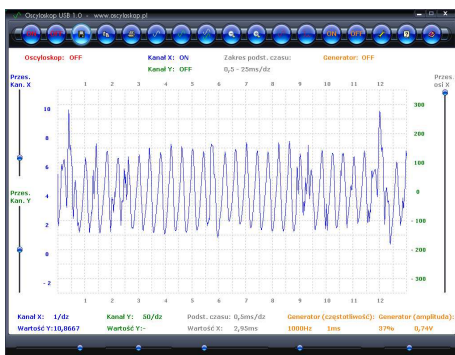
4. $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem, zasilanego z akumulatora 45 Ah (rys.8.20) i 36 Ah (rys. 8.21);
5. $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem, zasilanego z akumulatora 45 Ah (rys. 8.22) i 36 Ah (rys. 8.23) (zwiększone ΔU_{SZ}).



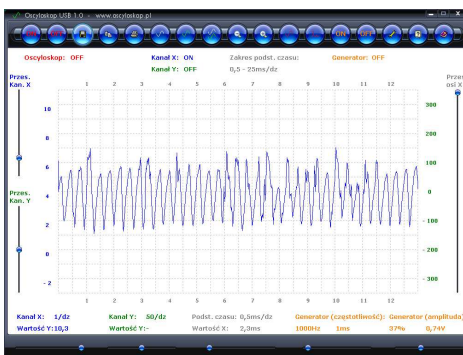
Rys. 8.15. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45 Ah



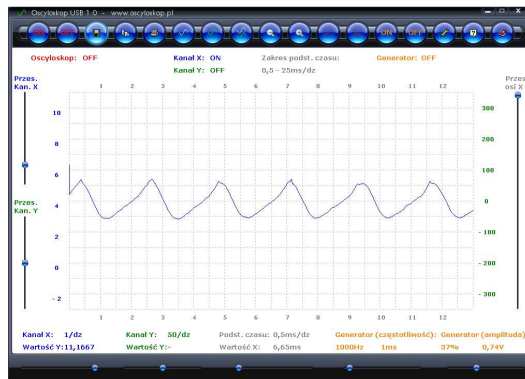
Rys. 8.16. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 36 Ah



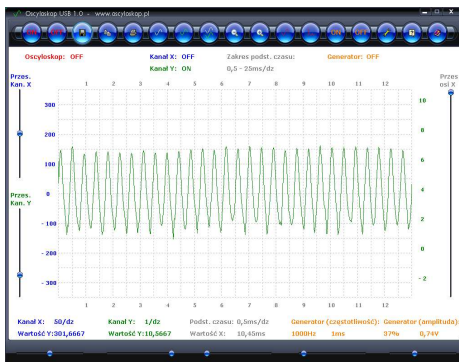
Rys. 8.17. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})



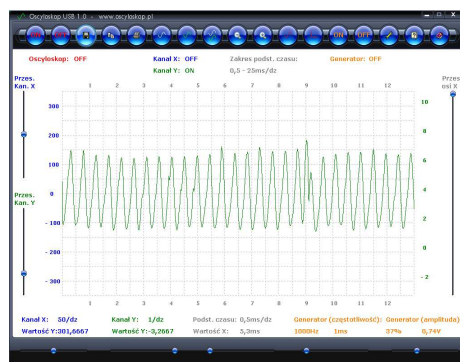
Rys. 8.18. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 36 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})



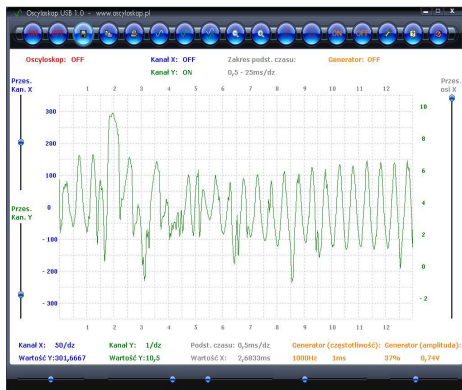
Rys. 8.19. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia, akumulator 36 Ah, stan naładowania 60% (zwiększone ΔU_{SZ})



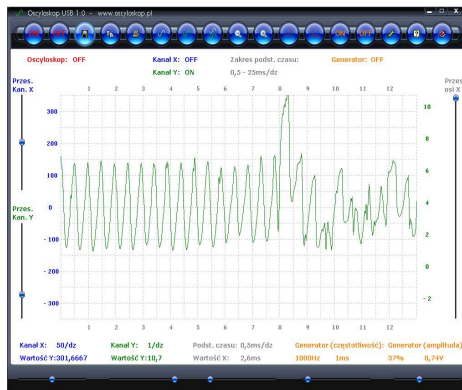
Rys. 8.20. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 45 Ah



Rys. 8.21. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 36 Ah



Rys. 8.22. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 45 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})

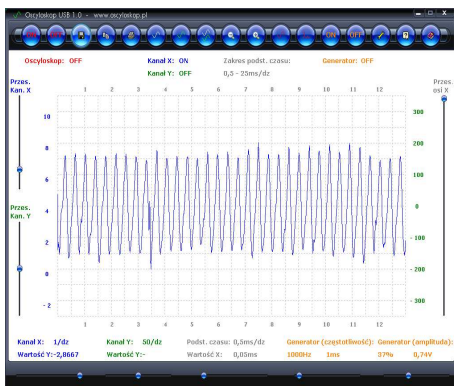


Rys. 8.23. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 36 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})

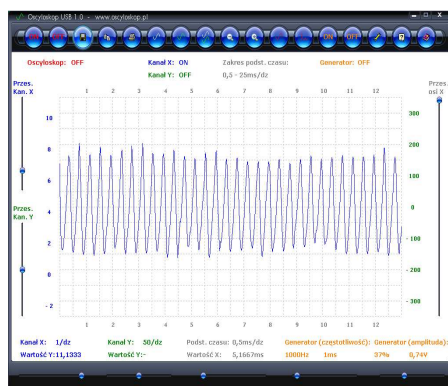
8.3.2. Oscylogramy przebiegu napięcia Halla dla rozrusznika R5, hallotron umieszczony na nabiegunkniku

Rejestracja przebiegów napięcia Halla w rozruszniku dla hallotronu umieszczonego na nabiegunkniku przeprowadzona została dla:

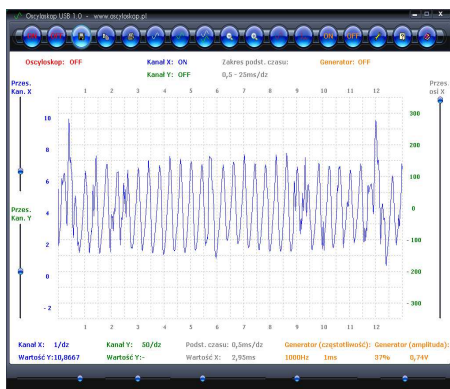
1. Rejestracji $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika, bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45 Ah (rys. 8.24) i 36 Ah (rys. 8.25);
2. Rejestracji $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika, bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45 Ah (rys. 8.26) i 36 Ah (rys. 8.27), (zwiększone ΔU_{SZ});
3. Rejestracji $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia, akumulator 36 Ah, stan naładowania 60% (rys. 8.28) (zwiększone ΔU_{SZ});
4. Rejestracji $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem, zasilanego z akumulatora 45 Ah (rys. 8.29) i 36 Ah (rys. 8.30);
5. Oscylogramu $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem, zasilanego z akumulatora 45 Ah (rys. 8.31) (zwiększone ΔU_{SZ}).



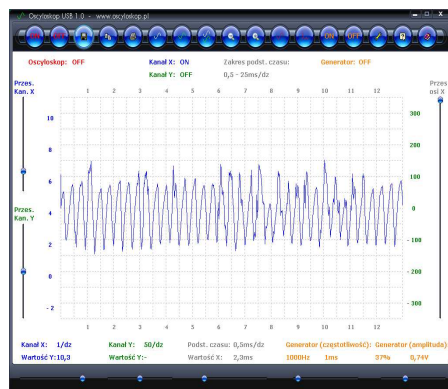
Rys. 8.24. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45 Ah



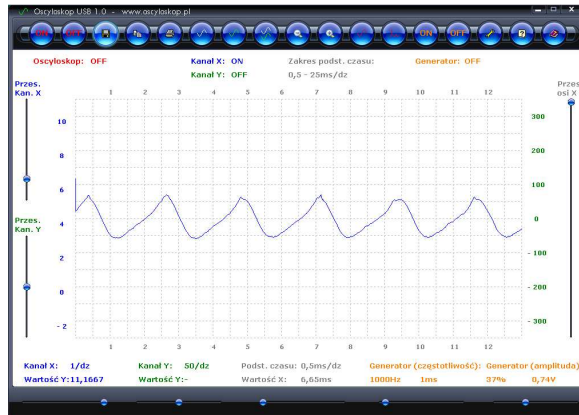
Rys. 8.25. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 36 Ah



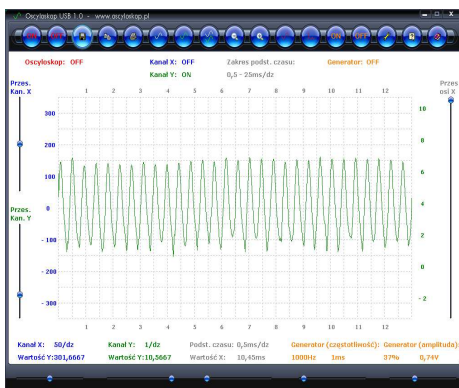
Rys. 8.26. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 45 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})



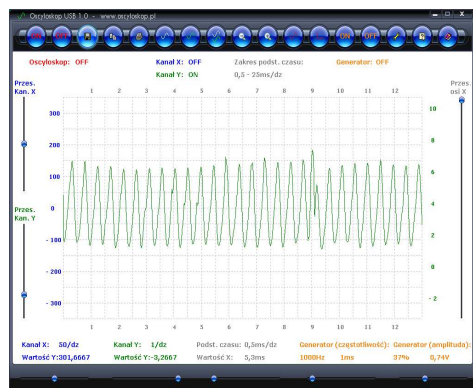
Rys. 8.27. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia zasilanego z akumulatora 36 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})



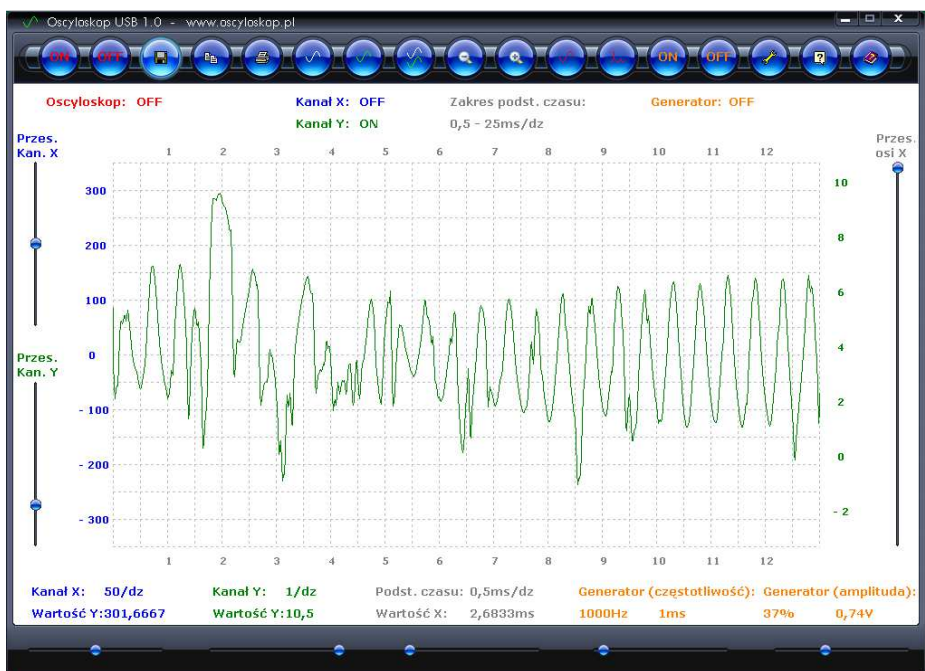
Rys. 8.28. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika bez obciążenia, akumulator 36 Ah, stan naładowania 60% (zwiększone ΔU_{Sz})



Rys. 8.29. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 45 Ah



Rys. 8.30. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 36 Ah



Rys. 8.31. Oscylogram $U_h = f(t)$ hallotronu dla rozrusznika z obciążeniem zasilanego z akumulatora 45 Ah (zwiększone ΔU_{SZ})

9. Przeprowadzenie wybranych badań weryfikacyjnych

Badania weryfikacyjne zostały przeprowadzone dla czterech rozruszników na oddzielnych stanowiskach badawczych:

1. Rozrusznik R76 o mocy 0,7 kW, silnik szeregowy;
2. Rozrusznik CT36021 o mocy 1,2 kW z magnesami trwałymi;
3. Rozrusznik R5 o mocy 1,5 kW, silnik szeregowy;
4. Rozrusznik E100 o mocy 1,5 kW, silnik szeregowo-bocznikowy.

W każdym rozruszniku w szczelinie przyjarzmowej został zamontowany czujnik hallotronowy do rejestracji sygnału indukcji magnetycznej w szczelinie. Poszczególne stanowiska wyposażono w układy hamujące (mechaniczne, hydrauliczne i pneumatyczne) umożliwiające wyznaczenie charakterystyki mocy elektrycznej i mocy mechanicznej. Dla wyznaczenia mocy mechanicznej wykorzystano czujniki prędkości obrotowej oraz czujniki tensometryczne umożliwiające rejestrację momentu hamowania. Każde stanowisko wyposażono w tory do rejestracji poszczególnych sygnałów wykorzystując karty pomiarowe Vellmana i AD – LINKA oraz laptop.

9.1. Badanie rozrusznika R76 (silnik szeregowy)

Stanowisko przedstawione na rysunku 9.1. składa się z: akumulatora, badanego rozrusznika, karty pomiarowej oraz laptopa.

Stanowisko umożliwia rejestrację następujących wielkości na biegu jałowym oraz podczas hamowania:

- prędkość obrotową rozrusznika,
- napięcie Halla,
- napięcie na rozruszniku,
- prąd pobierany przez rozrusznik.



Rys. 9.1. Widok stanowiska do badań rozrusznika R76

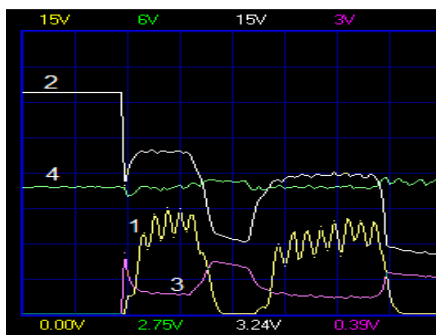
Badania rozrusznika przeprowadzono dla różnych uszkodzeń:

1. Zwiększona rezystancja przewodu zasilającego (R_p);
2. Zwiększony spadek napięcia pod szczotkami (ΔU_{sz});
3. Zużyta tulejka;
4. Zmienna pojemność akumulatora ($Q_1=36$ Ah, $Q_2=42$ Ah).

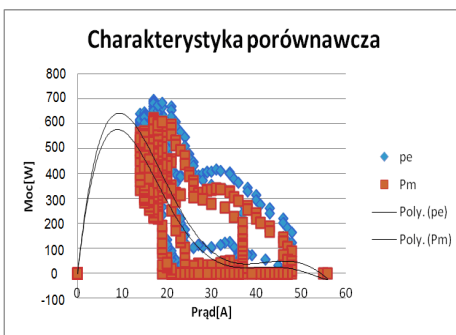
Rysunki od 9.2 do 9.17 przedstawiają zarejestrowane wyniki poszczególnych wielkości oraz charakterystyki porównawcze mocy mechanicznej i mocy elektrycznej obliczonych na podstawie otrzymanych wyników.

Wyniki rejestrowanych wielkości oznaczono cyframi oraz kolorami:

- prędkość obrotowa (kolor żółty) – 1,
- napięcie (kolor biały) – 2,
- natężenie prądu (kolor fioletowy) – 3,
- moment mechaniczny (kolor zielony) – 4.



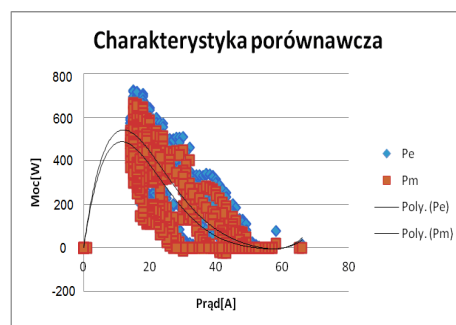
Rys. 9.2. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas hamowania rozrusznik
sprawny, akumulator Q_1



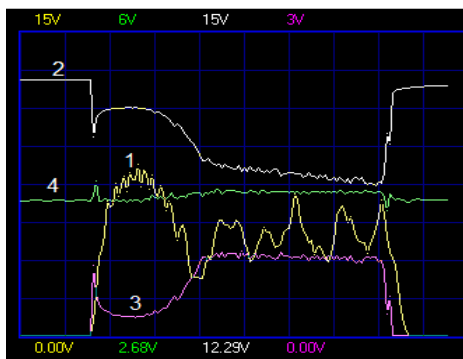
Rys. 9.3. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika – rozrusznik
sprawny, akumulator Q_1



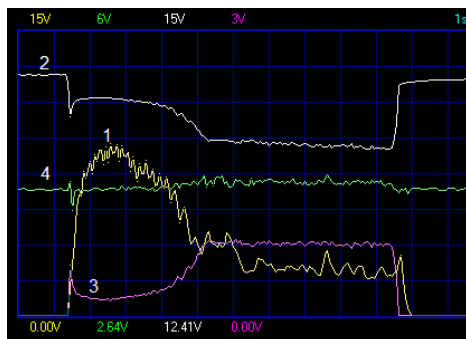
Rys. 9.4. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas hamowania rozrusznika
z zwiększoną rezystancją przewodu R_p ,
akumulator Q_1



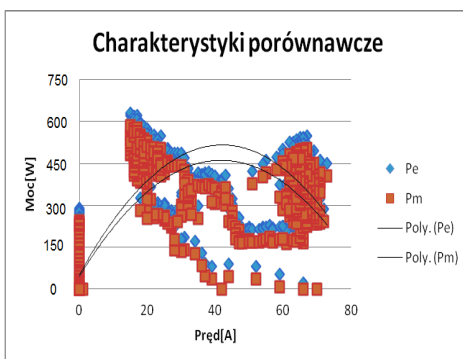
Rys. 9.5. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika z zwiększoną
rezystancją przewodu R_p , akumulator Q_1



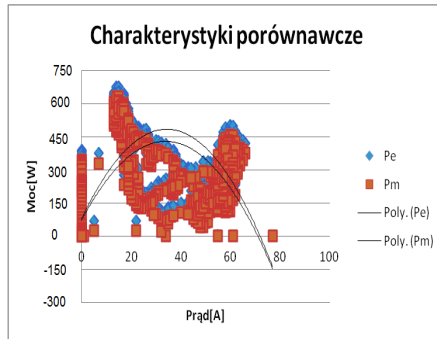
Rys. 9.6. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas hamowania rozrusznika
z zwiększonym ΔU_{SZ} , akumulator Q_1



Rys. 9.8. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas hamowania
rozrusznika z zużytą tulejką, akumulator Q_1



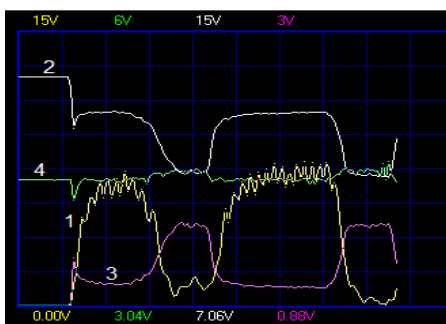
Rys. 9.7. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika z zwiększonym
 ΔU_{SZ} , akumulator Q_1



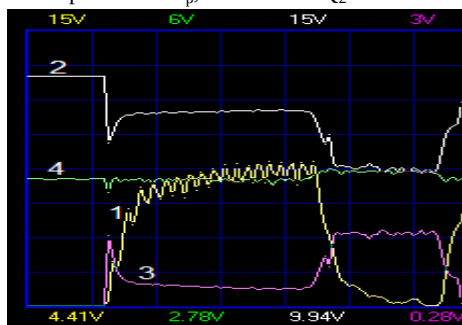
Rys. 9.9. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu z zużytą tulejką,
akumulator Q_1



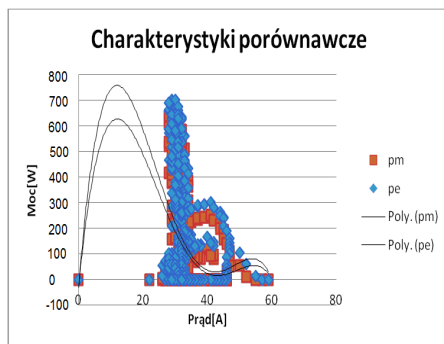
Rys. 9.10. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas hamowania –
rozrusznik sprawny, akumulator Q_2



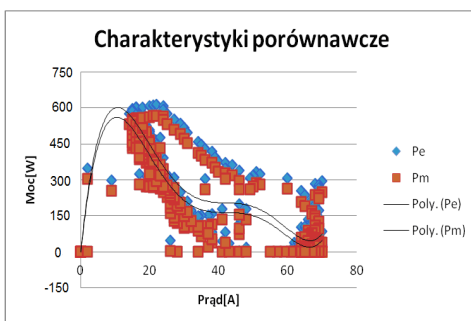
Rys. 9.12. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas hamowania
rozrusznika z zwiększoną rezystancją
przewodu R_p , akumulator Q_2



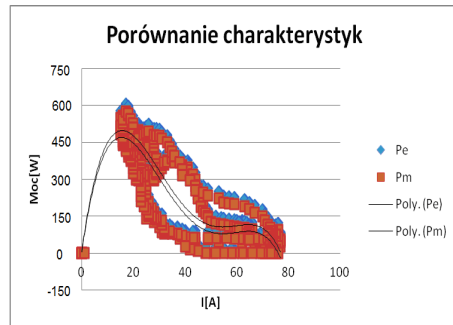
Rys. 9.14. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas zahamowania
rozrusznika z zwiększonym ΔU_{SZ} ,
akumulator Q_2



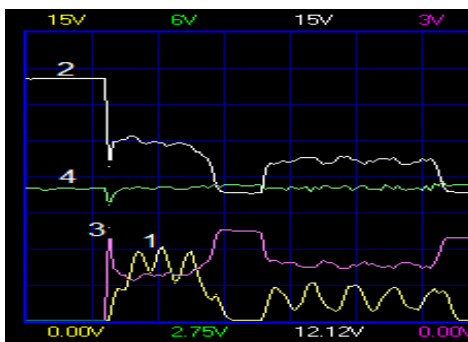
Rys. 9.11. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika – rozrusznik
sprawny, akumulator Q_2



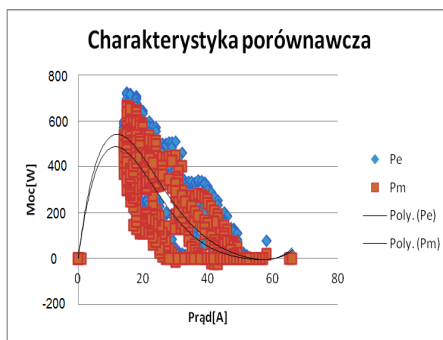
Rys. 9.13. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika z zwiększoną
rezystancją przewodu R_p , akumulator Q_2



Rys. 9.15. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika z zwiększonym
 ΔU_{SZ} , akumulator Q_2



Rys. 9.16. Zestawienie charakterystyk
1 – $n=f(t)$, 2 – $U=f(t)$, 3 – $I=f(t)$,
4 – $M=f(t)$, podczas zahamowania
rozzrusznika z zużytą tulejką, akumulator Q_2



Rys. 9.17. Charakterystyka porównawcza
mocy elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu rozrusznika z zużytą
tulejką, akumulator Q_2

9.2. Badania symulacyjne rozrusznika CT36021 (silnik z magnesami trwałymi)

Na stanowisku TS 1800 (rys. 9.18) przeprowadzono badania symulacyjne dla rozrusznika sprawnego oraz dla wybranych uszkodzeń. Na stanowisku przeprowadzono pomiary następujących wielkości podczas rozruchu, aż do zahamowania:

- prędkości obrotowej rozrusznika,
- spadku napięcia podczas rozruchu,
- prądu pobieranego przez rozrusznik,
- momentu rozrusznika podczas hamowania.

Pomiary spadku napięcia, poboru prądu przeprowadzono po zasileniu wyłącznika elektromagnetycznego i uruchomieniu rozrusznika. Proces hamowania zrealizowano za pomocą układu pneumatycznego zmieniając siłę hamowania, aż do zatrzymania rozrusznika.

Stanowisko przedstawione na rysunku 9.19 składa się z zespołów: badanego rozrusznika, pneumatycznego układu hamowania za pomocą pokrętła P, rejestratora analogowo-cyfrowego, laptopa oraz sprężarki. W bloku podstawowym mocowany jest rozrusznik oraz doprowadzone sprężone powietrze.



Rys. 9.18. Stanowisko do badań obwodów rozruchowych



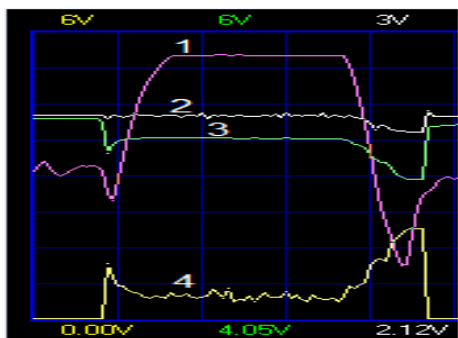
Rys. 9.19. Stanowisko do badania obwodu rozruchowego

9.2.1. Wyniki pomiarów zarejestrowanych wielkości

Wyniki rejestrowanych wielkości przedstawiają rysunki 9.20-9.33:

- prędkość obrotowa (kolor różowy), nr 1;
- moment (kolor biały), nr 2;
- napięcie (kolor zielony), nr 3;
- natężenie prądu (kolor żółty), nr 4;

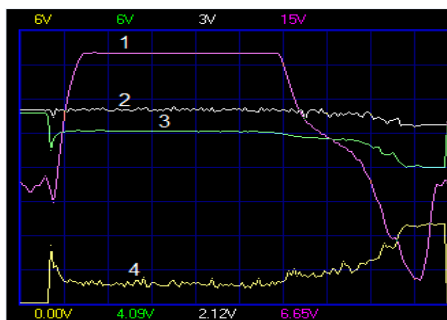
W górnej części ekranu przedstawiony jest zakres ustawienia napięcia poszczególnych kanałów.



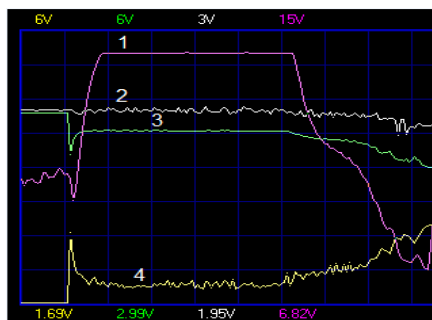
Rys. 9.20. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
(pomiar 1)



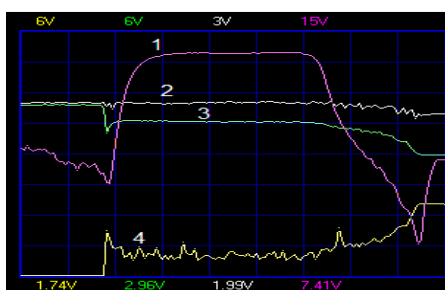
Rys. 9.21. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
(pomiar 2)



Rys. 9.22. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania (pomiar 3)



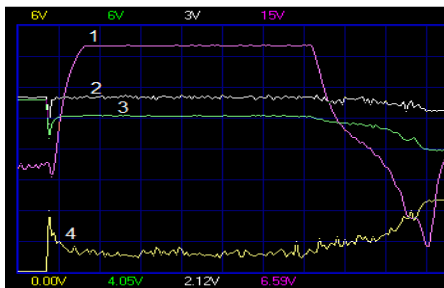
Rys. 9.23. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania (pomiar 4)



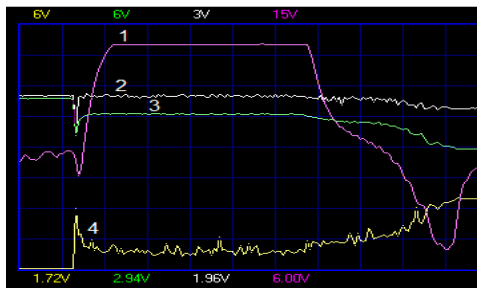
Rys. 9.24. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla tulejki (nr 1)



Rys. 9.25. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla tulejki (nr 2)



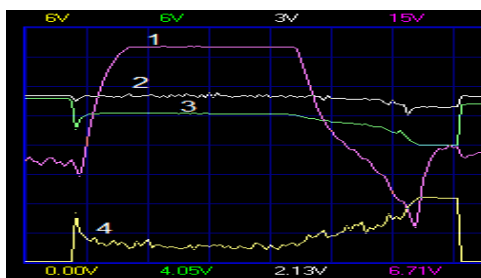
Rys. 9.26. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla tulejki (nr 3)



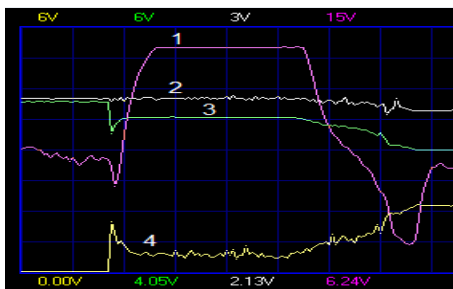
Rys. 9.27. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla zwiększonej rezystancji przewodu - R_{p1}



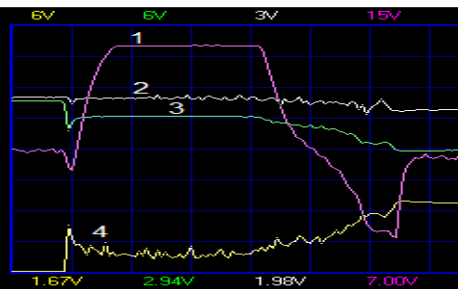
Rys. 9.28. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla zwiększonej rezystancji przewodu - R_{p2}



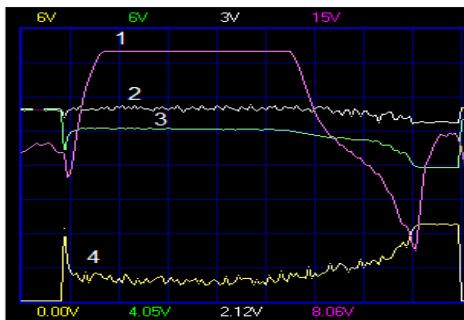
Rys. 9.29. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla zwiększonej rezystancji przewodu - R_{p3}



Rys. 9.30. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla zwiększonej rezystancji przewodu - R_{p4}



Rys. 9.31. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla zwiększonej rezystancji przewodu - R_{p5}

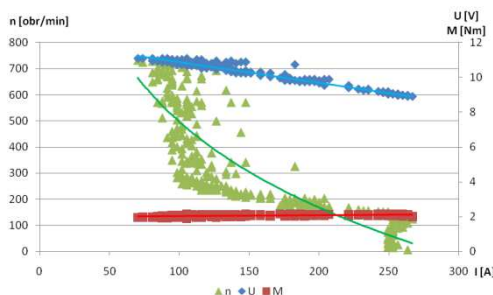


Rys. 9.32. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla ΔU_{SZ1}

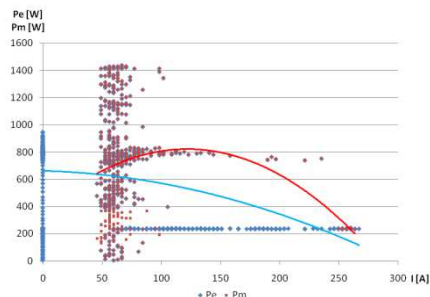


Rys. 9.33. Zestawienie charakterystyk
1 - $n=f(t)$, 2 - $M=f(t)$, 3 - $U=f(t)$,
4 - $I=f(t)$ podczas hamowania rozrusznika
dla ΔU_{SZ2}

Na rysunkach 9.34 oraz 9.36 przedstawiono charakterystyki prędkości obrotowej, napięcia oraz momentu w funkcji prądu podczas hamowania rozrusznika (pomiar 3, 4). Moment obrotowy zmienia się w niewielkim zakresie i wynosi 2,04 Nm podczas pomiaru. Prędkość obrotowa wynosi około 730 obr/min. Charakterystyka napięcia w funkcji prądu maleje wraz z jego wzrostem. Wartość napięcia zmalała do 9 V, przy wartości prądu 270 A.

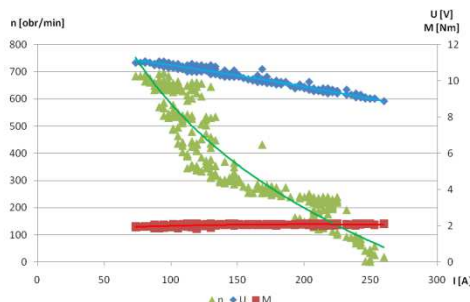


Rys. 9.34. Charakterystyka napięcia,
momentu i prędkości obrotowej
w funkcji prądu (pomiar 3)

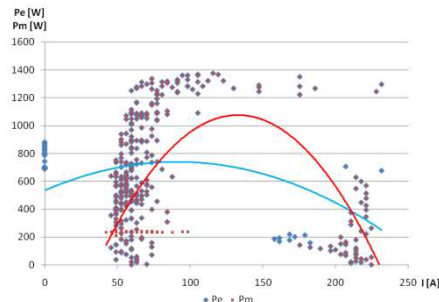


Rys. 9.35. Charakterystyka mocy
elektrycznej i mocy mechanicznej
w funkcji prądu (pomiar 3)

Rysunki 9.35 oraz 9.37 przedstawiają charakterystyki mocy mechanicznej i elektrycznej (pomiar 3,4) w funkcji prądu, podczas hamowania rozrusznika. Największa wartość mocy elektrycznej jak i mocy mechanicznej wynosi 1450 W, w przedziale prądu od 50 A do 100 A.

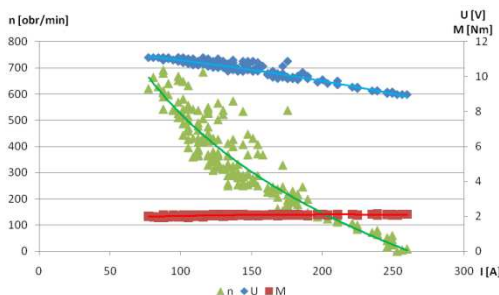


Rys. 9.36. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu (pomiar 4)

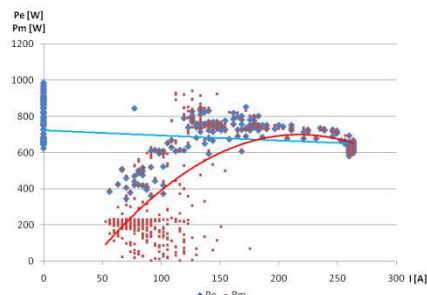


Rys. 9.37. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu (pomiar 4)

Na rysunku 9.38 przedstawiono charakterystyki prędkości obrotowej, napięcia oraz momentu w funkcji prądu dla tulejki nr 1. Moment obrotowy zmienia się w niewielkim zakresie i wynosi 1,98 Nm podczas pomiaru. Prędkość obrotowa osiąga wartości 700 obr/min. Charakterystyka napięcia w funkcji prądu maleje wraz z jego wzrostem. Wartość napięcia zmalała do 9 V, przy wartości prądu 270 A.



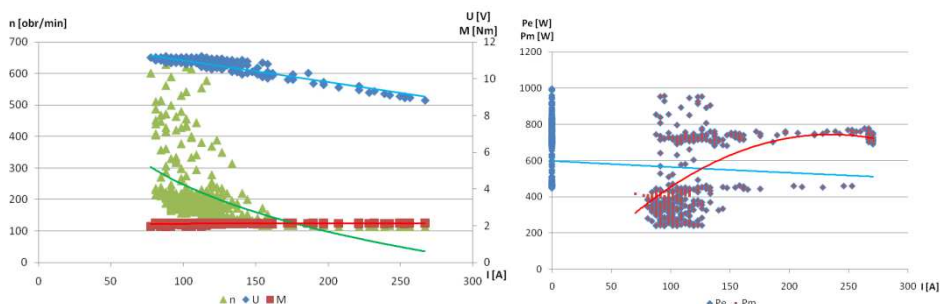
Rys. 9.38. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu dla tulejki nr 1



Rys. 9.39. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla tulejki nr 1

Rysunek 9.39 przedstawia charakterystyki mocy mechanicznej i elektrycznej w funkcji prądu dla tulejki nr1. Największa wartość mocy elektrycznej jak i mocy mechanicznej wynosi 1000 W przy wartości prądu od 100 do 150 A.

Na rysunku 9.40 przedstawiono charakterystyki prędkości obrotowej, napięcia oraz momentu w funkcji prądu dla tulejki nr 2. Moment obrotowy zmienia się w niewielkim zakresie i wynosi 2 Nm podczas pomiaru. Prędkość obrotowa osiąga wartość 700 obr/min. Zarejestrowano prędkość obrotową rzędu 130–250 obr/min w przedziale prądu od 100 do 200 A, spowodowaną ocieraniem wirnika o nabiegunniki. Charakterystyka napięcia w funkcji prądu maleje wraz z jego wzrostem. Wartość napięcia zmalała do 9 V, przy wartości prądu 270 A.

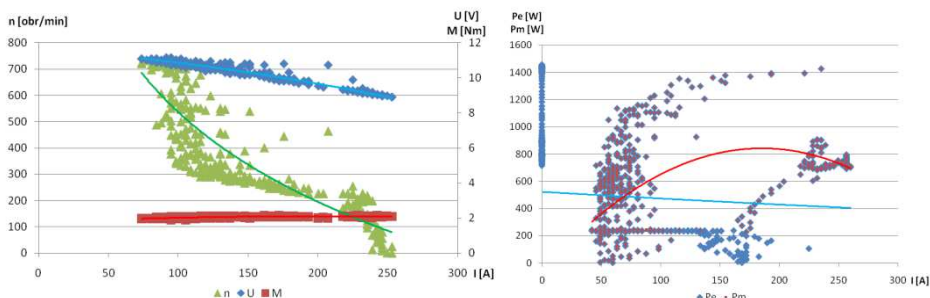


Rys. 9.40. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu dla tulejki nr 2

Rys. 9.41. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla tulejki nr 2

Rysunek 9.41 przedstawia charakterystyki mocy mechanicznej i elektrycznej w funkcji prądu dla tulejki nr 2. Największa wartość mocy elektrycznej jak i mocy mechanicznej wynosi 1000 W, przy wartości prądu od 90 do 150 A.

Na rysunku 9.42 przedstawiono charakterystyki prędkości obrotowej, napięcia oraz momentu w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – $R_p1=2m\Omega$. Moment obrotowy zmienia się w niewielkim zakresie i wynosi 1,9 Nm podczas pomiaru. Prędkość obrotowa wynosi 700 obr/min. Charakterystyka napięcia w funkcji prądu maleje wraz z jego wzrostem. Wartość napięcia zmalała do 9 V, przy wartości prądu 250 A.



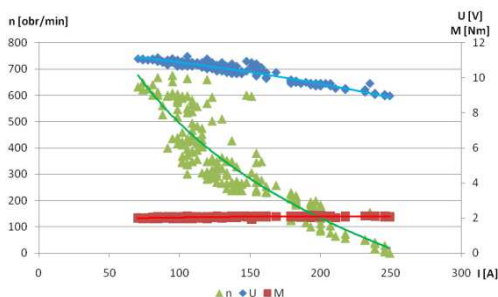
Rys. 9.42. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – R_p1

Rys. 9.43. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – R_p1

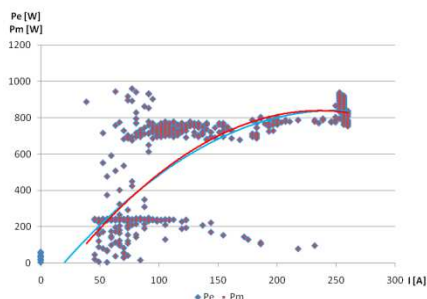
Rysunek 9.43. przedstawia charakterystyki mocy mechanicznej i elektrycznej w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – R_p1 . Największa wartość mocy elektrycznej jak i mocy mechanicznej wynosi 1500 W, przy wartości prądu od 50 do 100 A.

Na rysunku 9.44 przedstawiono charakterystyki prędkości obrotowej, napięcia oraz momentu w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – $R_p2=4m\Omega$.

Moment obrotowy zmienia się w niewielkim zakresie i wynosi 1,9 Nm podczas pomiaru. Prędkość obrotowa wynosi 700 obr/min. Charakterystyka napięcia w funkcji prądu maleje wraz z jego wzrostem. Wartość napięcia zmalała do 9 V, przy wartości prądu 250 A.



Rys. 9.44. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – R_{p2}

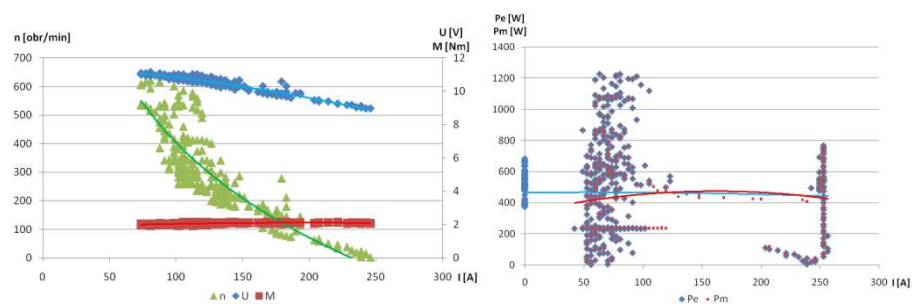


Rys. 9.45. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – R_{p2}

Rysunek 9.45 przedstawia charakterystyki mocy mechanicznej i elektrycznej w funkcji prądu dla rezystancji przewodu – R_{p2} . Największa wartość mocy elektrycznej jak i mocy mechanicznej wynosi 1000 W, przy wartości prądu od 50 do 100 A oraz 250 A.

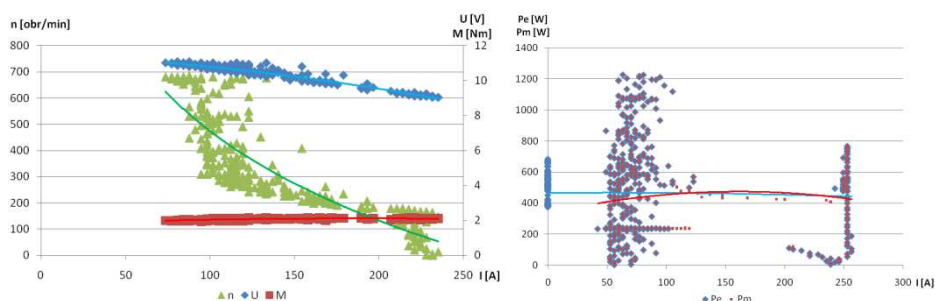
Na rysunku 9.46 i 9.48 przedstawiono charakterystyki prędkości obrotowej, napięcia oraz momentu w funkcji prądu dla ΔU_{sz1} , ΔU_{sz2} . Moment obrotowy zmienia się w niewielkim zakresie i wynosi 1,98 Nm podczas pomiaru. Prędkość obrotowa wynosi 630 obr/min. Charakterystyka napięcia w funkcji prądu maleje wraz z jego wzrostem. Wartość napięcia zmalała do 9 V, przy wartości prądu 250 A.

Rysunek 9.47 i 9.49 przedstawia charakterystyki mocy mechanicznej i elektrycznej w funkcji prądu dla ΔU_{sz1} , ΔU_{sz2} . Największa wartość mocy elektrycznej jak i mocy mechanicznej wynosi 1300 W, przy wartości prądu od 50 do 100 A.



Rys. 9.46. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu dla ΔU_{Sz1}

Rys. 9.47. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla ΔU_{Sz1}

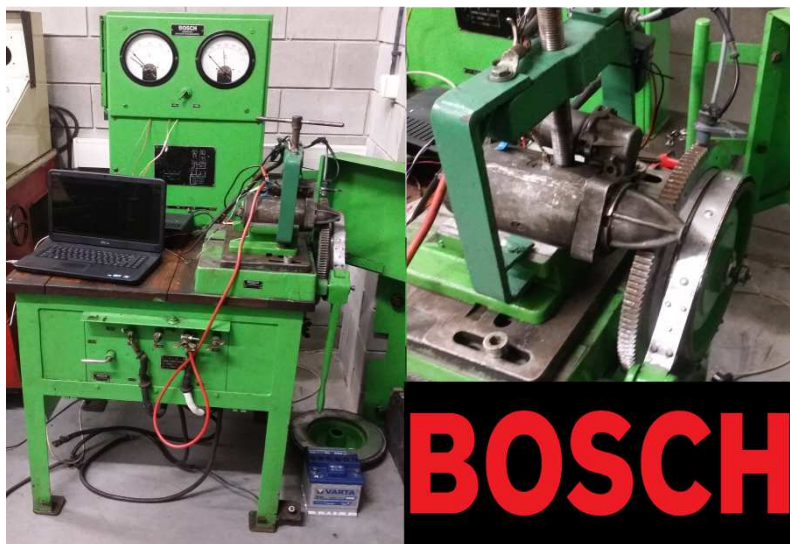


Rys. 9.48. Charakterystyka napięcia, momentu i prędkości obrotowej w funkcji prądu dla ΔU_{Sz2}

Rys. 9.49. Charakterystyka mocy elektrycznej i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla ΔU_{Sz2}

9.3. Badania weryfikacyjne rozruszników E100 (silnik szeregowo-bocznikowy)

Badania rozruszników przeprowadzono na stanowisku firmy Bosch. Rozrusznik E100 został zamontowany na wsporniku do montażu rozruszników i zabezpieczony śrubą dociskową. Ponadto została dobrana tarcza z odpowiednim modulem z hamulcem ciernym do obciążania rozrusznika. W korpusie rozrusznika został zainstalowany czujnik hallotronowy do pomiaru strumienia magnetycznego. Rejestrację poszczególnych sygnałów przeprowadzono wykorzystując kartę pomiarową Vellman. Wyniki pomiarów rejestrowano na komputerze przenośnym. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 9.50.

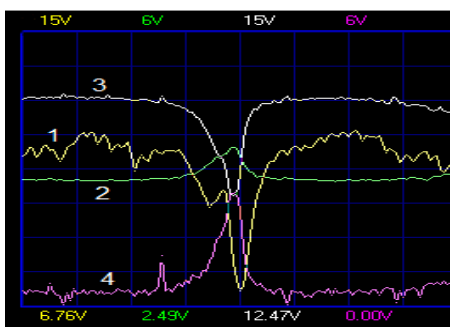


Rys. 9.50. Stanowisko do badań rozruszników firmy Bosch

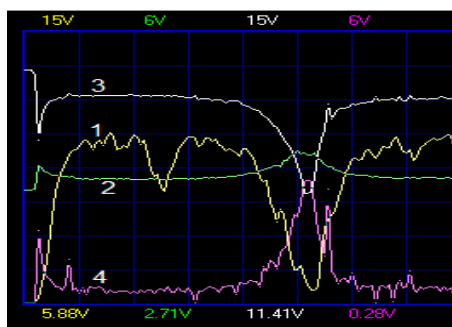
Wyniki rejestrowanych wielkości przedstawiono na rysunkach 9.51–9.54. Podczas badań rejestrowano następujące wielkości:

- prędkość obrotowa (kolor żółty), nr 1;
- napięcie Halla (kolor zielony), nr 2;
- napięcie na rozruszniku (kolor biały), nr 3;
- natężenie prądu (kolor różowy), nr 4;

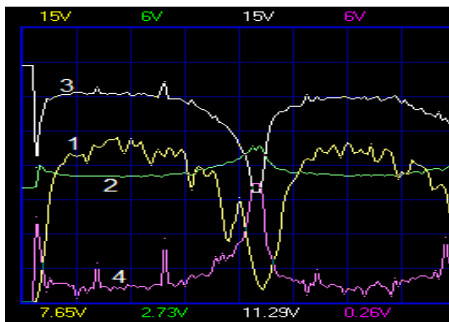
W górnej części wykresu przedstawiony jest zakres ustawienia napięcia poszczególnych kanałów.



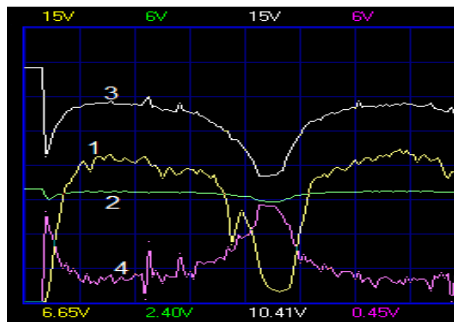
Rys. 9.51. Zestawienie charakterystyk podczas hamowania rozrusznika sprawnego,
1 – $n=f(t)$, 2 – $U_H=f(t)$, 3 – $U=f(t)$,
4 – $I=f(t)$



Rys. 9.52. Zestawienie charakterystyk podczas hamowania rozrusznika z zużytą tulejką,
1 – $n=f(t)$, 2 – $U_H=f(t)$, 3 – $U=f(t)$,
4 – $I=f(t)$

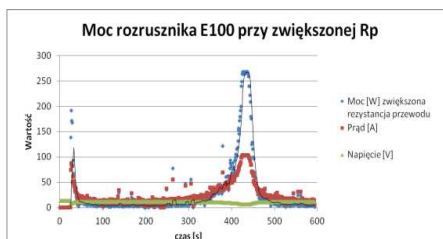


Rys. 9.53. Zestawienie charakterystyk podczas hamowania rozrusznika o zwiększonej R_p , 1 – $n=f(t)$, 2 – $U_H=f(t)$, 3 – $U=f(t)$, 4 – $I=f(t)$

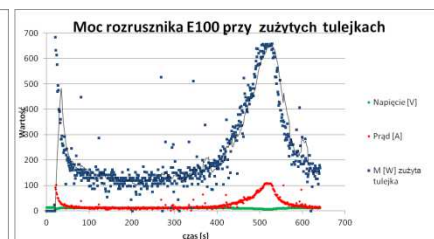


Rys. 9.54. Zestawienie charakterystyk podczas hamowania rozrusznika z zwiększonym ΔU_s , 1 – $n=f(t)$, 2 – $U_H=f(t)$, 3 – $U=f(t)$, 4 – $I=f(t)$

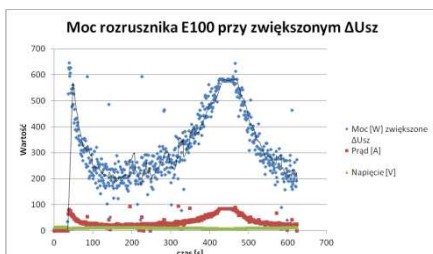
Z otrzymanych wyników wyznaczono moc elektryczną dla poszczególnych stanów uszkodzeń oraz dla sprawnego rozrusznika (rys. 9.55–9.63). Zestawienie mocy elektrycznych oraz napięcia Halla dla czterech stanów rozrusznika przedstawiają rys. 9.63 i 9.64.



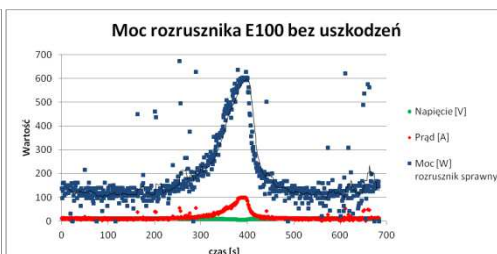
Rys. 9.55. Charakterystyka mocy rozrusznika E100 przy zwiększonym R_p



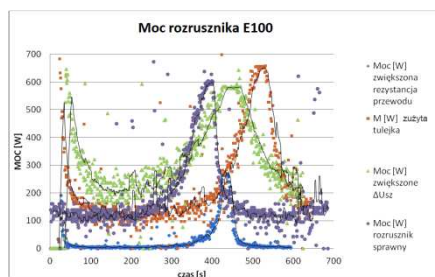
Rys. 9.60. Charakterystyka mocy rozrusznika E100 przy zużytej tulejce



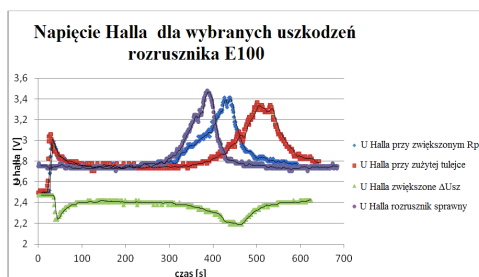
Rys. 9.61. Charakterystyka mocy rozrusznika E100 przy zwiększonym ΔU_s



Rys. 9.62. Charakterystyka mocy rozrusznika E100 bez uszkodzeń



Rys. 9.63. Charakterystyki mocy rozrusznika E100 dla wybranych uszkodzeń



Rys. 9.64. Charakterystyki napięcia Halla rozrusznika E100 dla wybranych uszkodzeń

9.4. Badania weryfikacyjne rozrusznika R5 (silnik szeregowy)

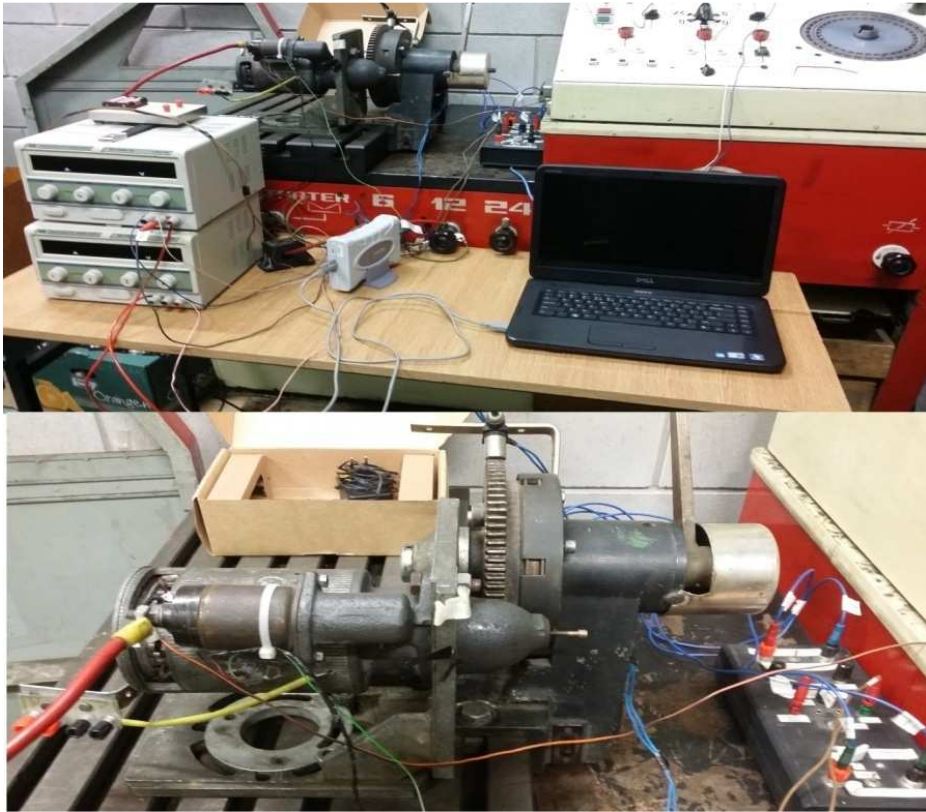
Przedmiotem badań weryfikacyjnych były rozruszniki R5 jako typowy silnik szeregowy. Rejestrację poszczególnych wielkości przeprowadzono wykorzystując stanowisko Elkon Super 3 (rys. 9.65). Na rys. 9.66 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk rozrusznika. Pierwszy blok programu napisanego w środowisku LabView konfiguruje parametry próbkowania karty pomiarowej USB 1901 AD – LINK. W bloku tym ustala się częstotliwość i liczbę próbek do rejestracji. Rejestracja przeprowadzana jest w trybie dynamicznym. Po zebraniu zadanej liczby próbek sygnału DDT wydzielane są dane pochodzące z poszczególnych kanałów i zapisywane w tablicach. Następnie dane przeliczane są na poszczególne wielkości mierzone wykorzystując współczynniki kalibracji dla poszczególnych kanałów. Prędkość obrotowa zarejestrowana jest w tablicy w postaci standardowych impulsów napięciowych z czujnika KNI 15. Pojawienie się zęba koła impulsowego pod czujnikiem magnetorezystancyjnym powoduje zarejestrowanie skokowej zmiany napięcia na wyjściu czujnika. Podprogram obliczanie prędkości obrotowej przegląda tablice zarejestrowanych napięć z czujnika i wyznacza kolejny numer zęba i odpowiadający mu indeks w tablicy. W ten sposób można wyznaczyć czas pomiędzy dwoma kolejnymi zębami, przeliczyć go na czas trwania pełnego obrotu i estymować chwilową wartość prędkości obrotowej. Indeksy w tablicach prędkości obrotowej określające moment pojawienia się zęba pod czujnikiem służą do wyboru z tablic zarejestrowanych wielkości tych wartości, które odpowiadają sygnałom wejściowym w chwili pojawienia się zęba.

Na wykresach przedstawiono dane pochodzące z zapisanych wielkości (rys. 9.67–9.70, a–e) zebrane za pomocą karty USB 19001 AD – LINK oraz resamplowane dane (rys. 9.67–9.70, f–l) w chwilach pojawienia się zębów. Na wspólnym wykresie zebrano obliczone na podstawie resamplowanych danych poszczególne wielkości: napięcie na rozruszniku, prąd płynący przez rozrusznik, moc elektryczną, przebieg indukcji w szczelinie przyjarzowej, przebieg momentu,

przebieg prędkości obrotowej oraz mocy mechanicznej rozrusznika. Poza dwoma rejestrowanymi wielkościami prądu i napięcia analizowany jest przebieg sygnału z czujnika Halla proporcjonalny do wektora indukcji. Program umożliwia zapisywanie wartości poszczególnych wielkości w postaci osobnych plików danych w formacie arkusza kalkulacyjnego.

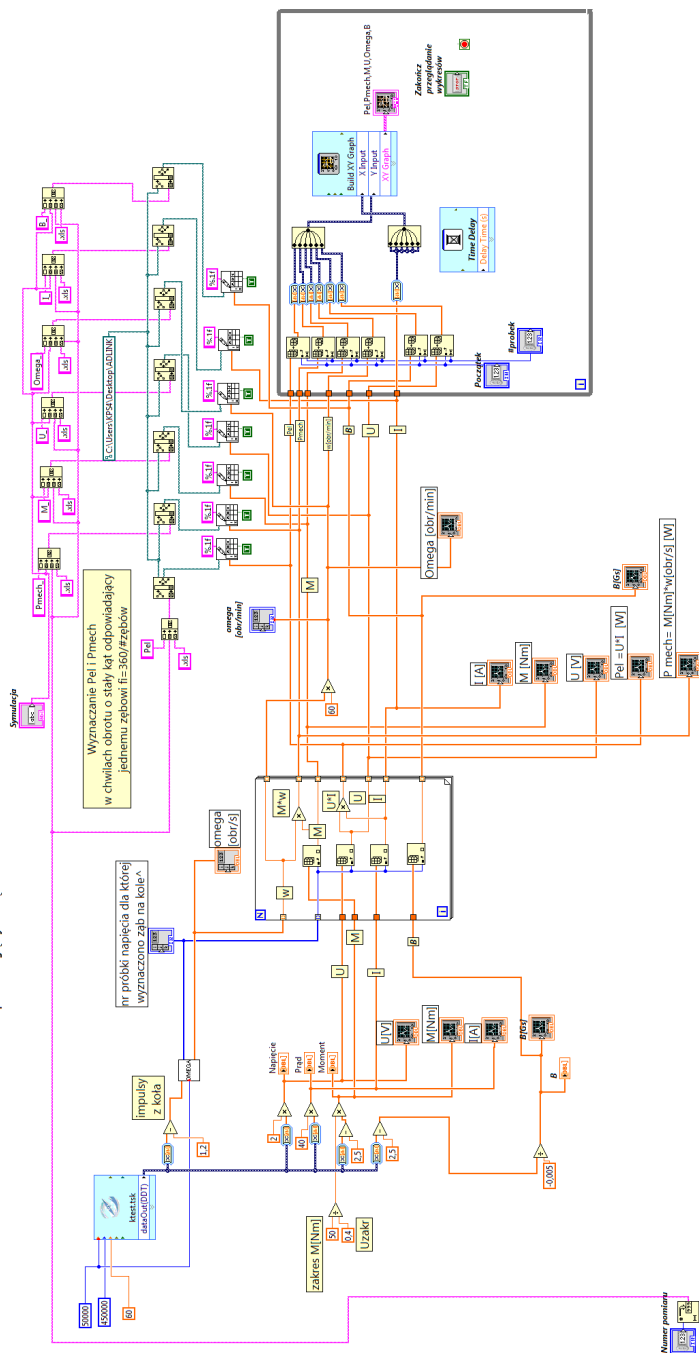
Do rejestracji poszczególnych wielkości wykorzystano kartę pomiarową do której doprowadzono kondycjonowane sygnały pochodzące z czujników i przetworników. Sygnał prądu pochodzi z czujnika LEM, który zapewnia izolację galwaniczną i kondycjonuje napięcie doprowadzone do karty pomiarowej. Sygnał napięcia na rozruszniku doprowadzony jest do karty przez wzmacniacz izolacyjny AD 202. Do pomiaru momentu zastosowano pełny mostek tensometryczny i wzmacniacz pomiarowy o wzmocnieniu $K=100$. Do pomiaru prędkości obrotowej użyto czujnika magnetorezystancyjnego KNI 15 z wyjściem prądowym, a do pomiaru indukcji w szczelinie przyjarzmowej wykorzystano czujnik Halla Allegro A1324. Wyniki pomiarów dla rozrusznika R5 sprawnego przedstawia rys. 9.67.

Wyniki pomiarów dla rozrusznika ze zwiększonym ΔU_{SZ} przedstawia rys. 9.68, zwiększonym R_p (rys. 9.69) i zużytą tulejką (rys. 9.70). Oznaczenia charakterystyk przedstawione na rysunkach: a – moc mechaniczna – P_{mech} i prędkość kątowna – ω , b – napięcie na rozruszniku, c – prąd pobierany przez rozrusznik, d – moment mechaniczny, e – indukcja, przebiegi wielkości w punktach odpowiadających pojawieniu się kolejnych impulsów na kole przedstawiają: f – napięcie na rozruszniku, g – prąd pobierany przez rozrusznik, h – moc elektryczna, i – indukcja, j – moment mechaniczny, k – prędkość obrotowa, l – moc mechaniczna. Charakterystyki mocy mechanicznej rozrusznika R5 sprawnego i wybranych uszkodzeń przedstawia rys. 9.71, natomiast charakterystyki indukcji magnetycznej rozrusznika R5 sprawnego i wybranych uszkodzeń (rys. 9.72).

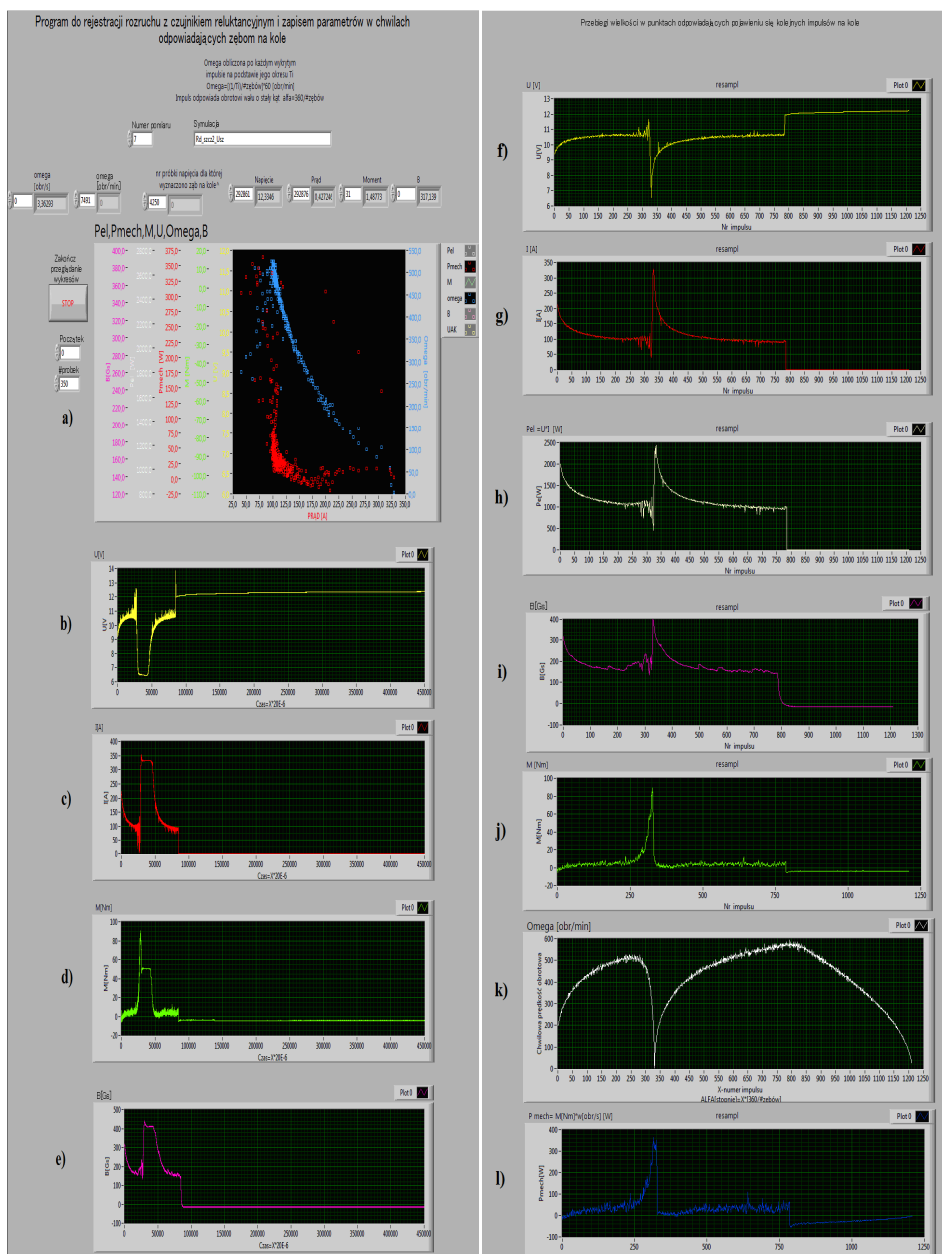


Rys. 9.65. Stanowisko do badania rozruszników firmy ELKON

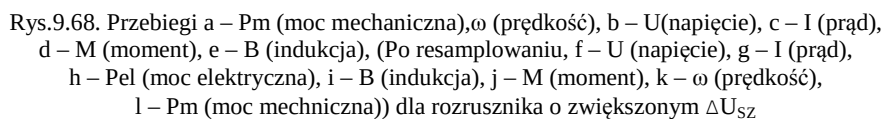
Program do rejestracji rozruchu z czujnikiem reluktancyjnym i zapisem parametrów w chwilach odpowiadających zębom na kole

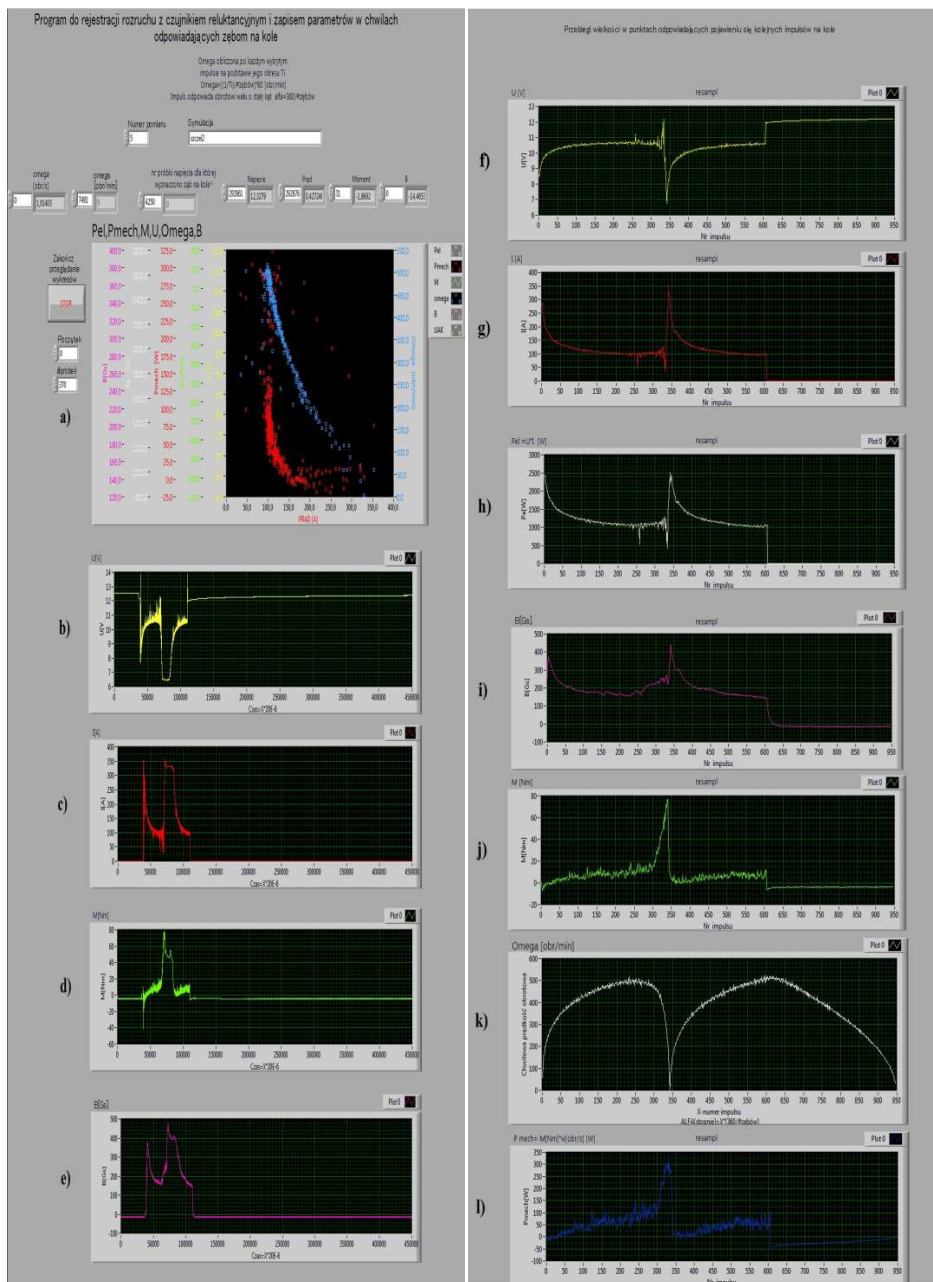


Rys. 9.66. Schemat układu do wyznaczania charakterystyk rozrusznika

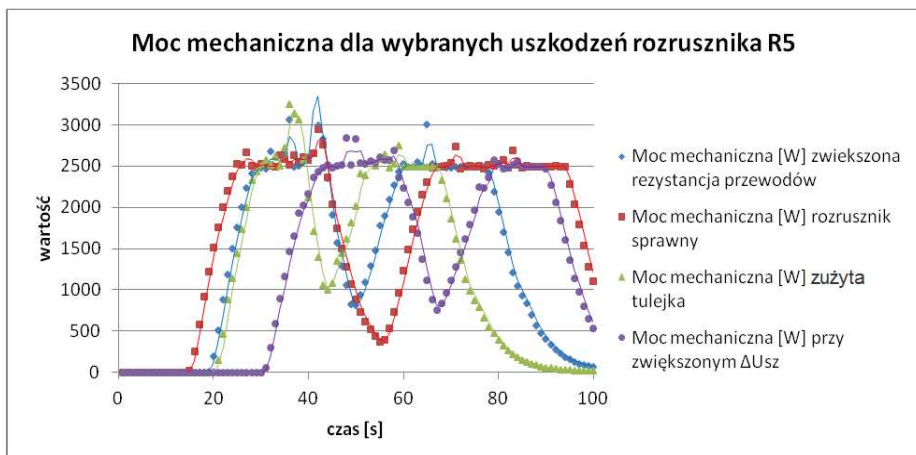


Rys. 9.67. Przebiegi a – ω (prędkość), P_m (moc mechaniczna), b – U (napięcie), c – I (prąd), d – M (moment), e – B (indukcja), (Po resampłowaniu, f – U (napięcie), g – I (prąd), h – P_{el} (moc elektryczna), i – B (indukcja), j – M (moment), k – ω (prędkość), l – P_m (moc mechaniczna)) dla rozrusznika sprawnego

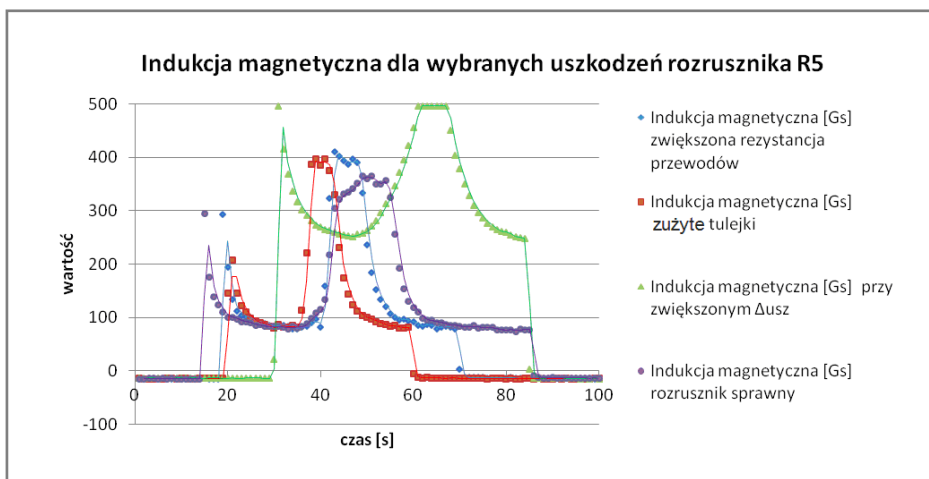




Rys. 9.70. Przebiegi a – Pm (moc mechaniczna), ω (prędkość), b – U (napięcie), c – I (prąd), d – M (moment), e – B (indukcja), (Po resamplowaniu, f – U (napięcie), g – I (prąd), h – Pel (moc elektryczna), i – B (indukcja), j – M (moment), k – ω (prędkość), l – Pm (moc mechaniczna)) dla rozrusznika z zużytą tulejką



Rys. 9.71. Charakterystyka mocy mechanicznej rozrusznika R5 dla wybranych uszkodzeń



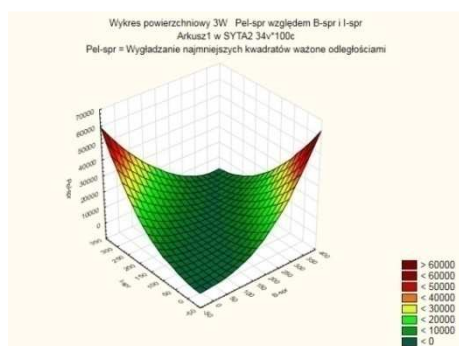
Rys. 9.72. Charakterystyka indukcji magnetycznej rozrusznika R5 dla wybranych uszkodzeń

10. Opracowanie wyników

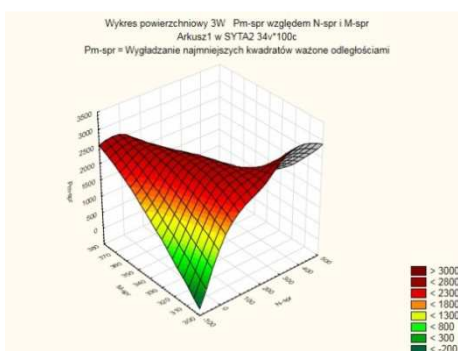
10.1. Wprowadzenie

Analizę otrzymanych wyników przeprowadzono dla rozrusznika R5 z silnikiem szeregowym wykorzystując program Statistica. Stosując wygładzanie najmniejszych kwadratów ważonych otrzymano wykresy powierzchniowe dla następujących wielkości:

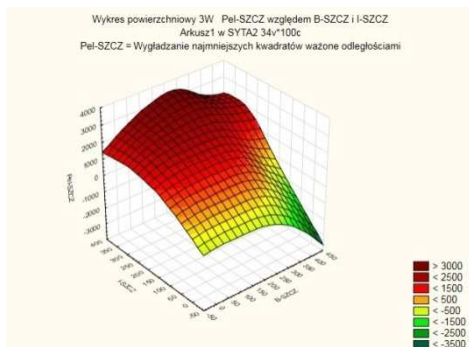
1. Moc elektryczna w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.1);
2. Moc mechaniczna w funkcji momentu i prędkości obrotowej dla rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.2);
3. Moc elektryczna w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.3);
4. Napięcie w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.4);
5. Napięcie w funkcji prądu i indukcji rozrusznika R5 z podwieszoną szczotką (rys. 10.5).



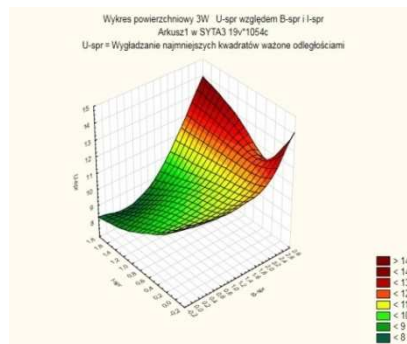
Rys. 10.1. Moc elektryczna w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika R5 sprawnego



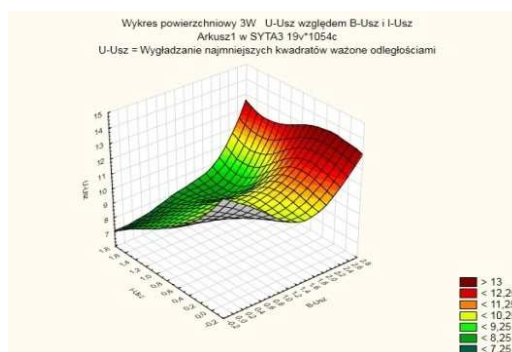
Rys. 10.2. Moc mechaniczna w funkcji momentu i prędkości obrotowej dla rozrusznika R5 sprawnego



Rys. 10.3. Moc elektryczna w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika R5 z zużytą tulejką



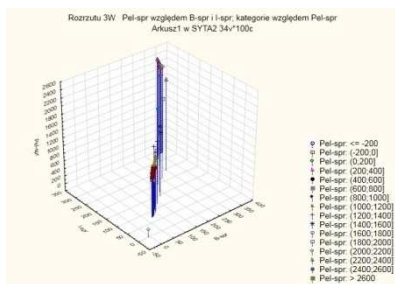
Rys. 10.4. Napięcie w funkcji prądu i indukcji dla rozrusznika R5 sprawnego



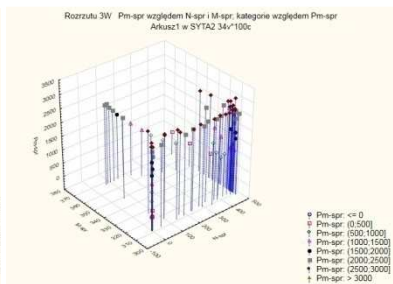
Rys. 10.5. Napięcie w funkcji prądu i indukcji rozrusznika R5 z podwieszoną szczotką

Dla powyższych uszkodzeń sporządzono wykresy rozrzutu:

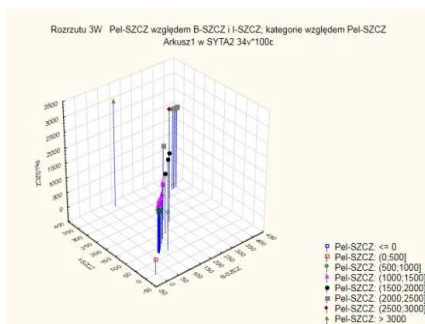
1. Mocy elektrycznej w funkcji prądu i indukcji rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.6);
2. Mocy mechanicznej względem momentu i prędkości obrotowej rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.7);
3. Mocy mechanicznej względem prądu i indukcji rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.8);
4. Pomiędzy napięciem a prądem i indukcją rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.9);
5. Pomiędzy napięciem a prądem i indukcją rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.10);
6. Napięcia względem prądu i indukcji rozrusznika R5 z podwieszoną szczotką (rys. 10.11).



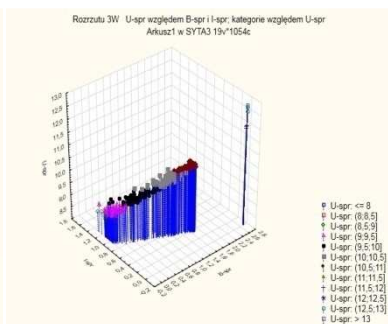
Rys. 10.6. Wykres rozrzu 3W Pm-spr względem B-spr i I-spr; kategorie względem Pel-spr
rozzrusznika R5 sprawnego



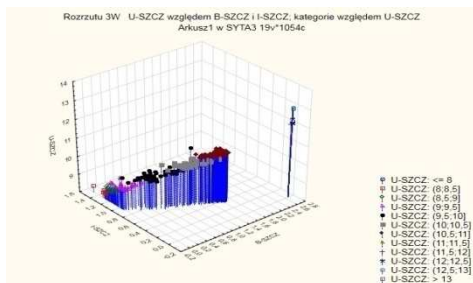
Rys. 10.7. Wykres rozrzu 3W Pm-spr względem B-spr i I-spr; kategorie względem Pm-spr
i prędkości obrotowej rozzrusznika R5
sprawnego



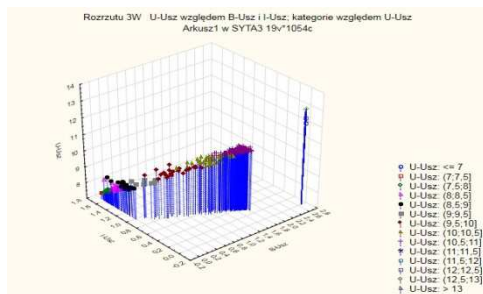
Rys. 10.8. Wykres rozrzu 3W Pm-SZCZ względem B-SZCZ i I-SZCZ; kategorie względem Pel-SZCZ
rozzrusznika R5 z zużyłą tulejką



Rys. 10.9. Wykres rozrzu 3W U-spr względem B-spr i I-spr; kategorie względem U-spr
napięciem a prądem i indukcją rozzrusznika
R5 sprawnego



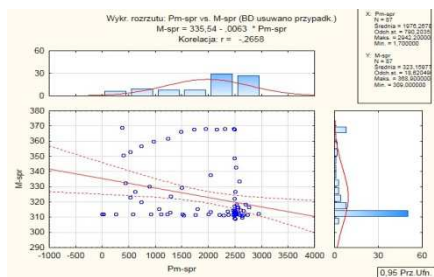
Rys. 10.10. Wykres rozrzu 3W U-SZCZ względem B-SZCZ i I-SZCZ; kategorie względem U-SZCZ
napięciem a prądem i indukcją rozzrusznika
R5 z zużyłą tulejką



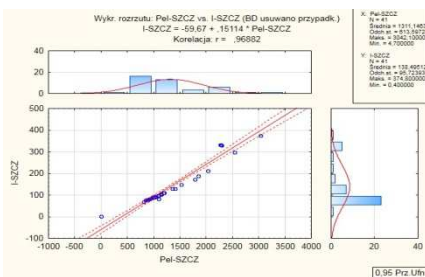
Rys. 10.11. Wykres rozrzu 3W U-Uz względem B-Uz i I-Uz; kategorie względem U-Uz
względem prądu i indukacji rozzrusznika R5
z podwieszoną szczotką

Dla rozrusznika R5 przeprowadzono dla następujących wielkości korelację między:

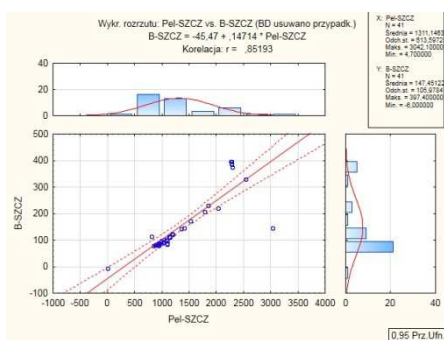
1. Mocą mechaniczną a momentem rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.12);
2. Mocą elektryczną a prądem rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.13);
3. Korelacja między mocą elektryczną a indukcją rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.14);
4. Korelacja między mocą elektryczną a prądem rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.15);
5. Korelacja między mocą elektryczną a indukcją rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.16);
6. Korelacja między mocą mechaniczną a prędkością rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.17);
7. Korelacja między napięciem a indukcją rozrusznika R5 z podwieszoną szczotką (rys. 10.18);
8. Korelacja między napięciem a prądem rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.19);
9. Korelacja między napięciem a indukcją rozrusznika R5 z zużytą tulejką (rys. 10.20);
10. Korelacja między napięciem a prądem rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.21);
11. Korelacja między napięciem a indukcją rozrusznika R5 sprawnego (rys. 10.22);
12. Korelacja między napięciem a prądem rozrusznika R5 z podwieszoną szczotką (rys. 10.23).



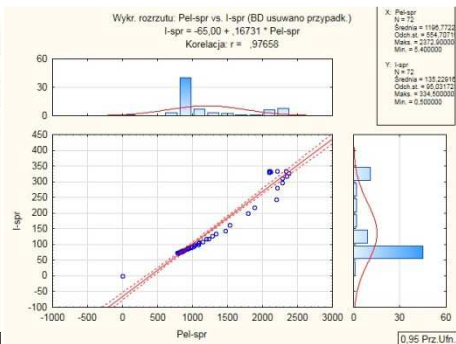
Rys. 10.12. Korelacja między mocą mechaniczną a momentem rozrusznika R5 sprawnego



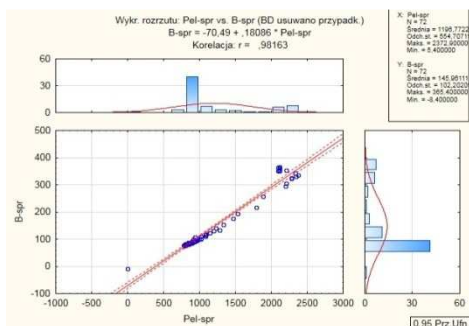
Rys. 10.13. Korelacja między mocą elektryczną a prądem rozrusznika R5 z zużytą tulejką



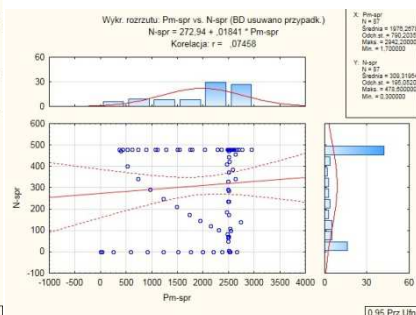
Rys. 10.14. Korelacja między mocą elektryczną a indukcją rozrusznika R5 z zużytą tulejką



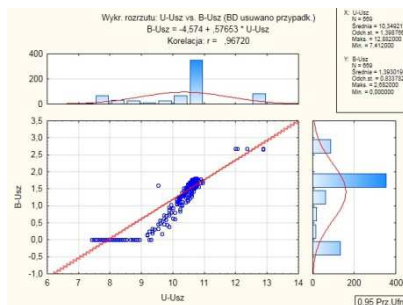
Rys. 10.15. Korelacja między mocą elektryczną a prądem rozrusznika R5 sprawnego



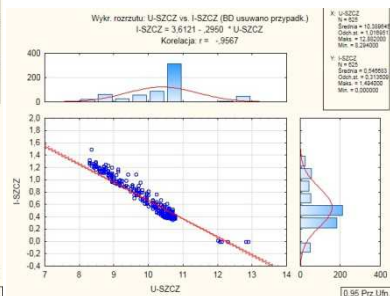
Rys. 10.16. Korelacja między mocą elektryczną a indukcją rozrusznika R5 sprawnego



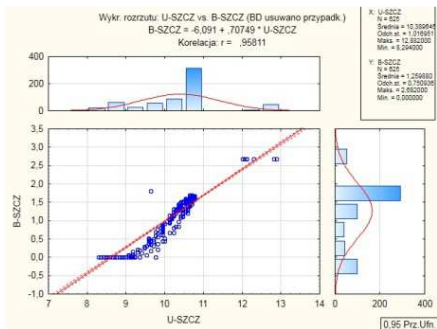
Rys. 10.17. Korelacja między mocą mechaniczną a prędkością rozrusznika R5 sprawnego



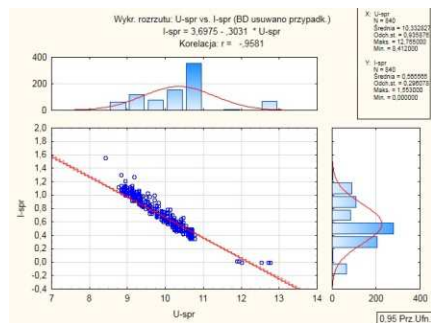
Rys. 10.18. Korelacja między napięciem a indukcją rozrusznika R5 z podwieszoną szczytką



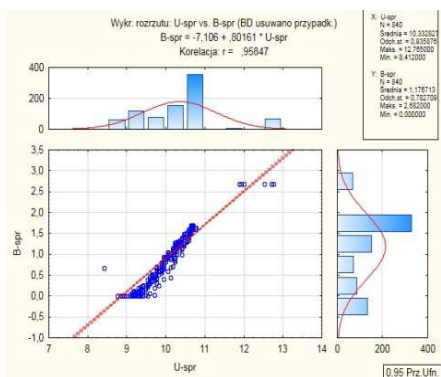
Rys. 10.19. Korelacja między napięciem a prądem rozrusznika R5 z zużytą tulejką



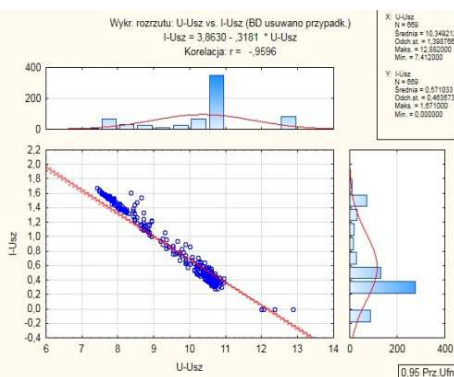
Rys. 10.20. Korelacja między napięciem a indukcją rozrusznika R5 z zużytą tulejką



Rys. 10.21. Korelacja między napięciem a prądem rozrusznika R5 sprawnego



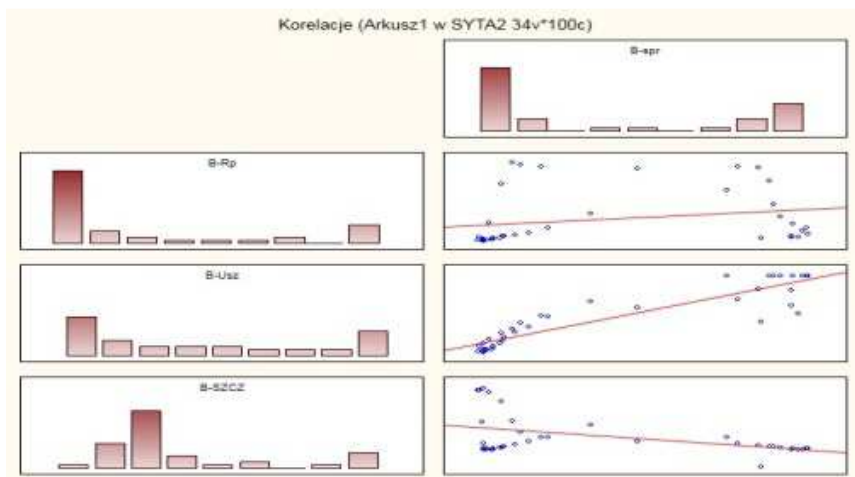
Rys. 10.22. Korelacja między napięciem a indukcją rozrusznika R5 sprawnego



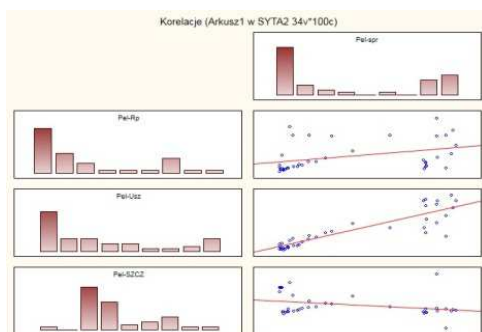
Rys. 10.23. Korelacja między napięciem a prądem rozrusznika R5 z podwieszoną szczotką.

Zestawienie korelacji poszczególnych wielkości dla różnych uszkodzeń rozrusznika:

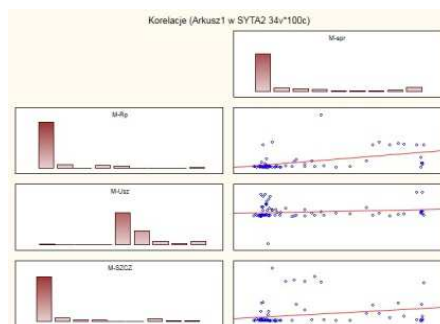
1. Indukcji rozrusznika R5 sprawnego a indukcji rozrusznika R5 o zwiększonym Rp, podwieszoną szczotką i zużytą tulejką (rys. 10.24);
2. Mocy elektrycznej rozrusznika R5 sprawnego, a mocy elektrycznej rozrusznika R5 o zwiększonym Rp, podwieszoną szczotką i zużytą tulejką (rys. 10.25);
3. Momentem rozrusznika R5 sprawnego, a momentem rozrusznika R5 o zwiększonym Rp, podwieszoną szczotką i zużytą tulejką (rys. 10.26);
4. Mocy mechanicznej rozrusznika R5 sprawnego, a mocy mechanicznej rozrusznika R5 o zwiększonym Rp, podwieszoną szczotką i zużytą tulejką (rys. 10.27);
5. Prądem rozrusznika R5 sprawnego a prądem rozrusznika R5 o zwiększonym Rp, podwieszoną szczotką i zużytą tulejką (rys. 10.28).



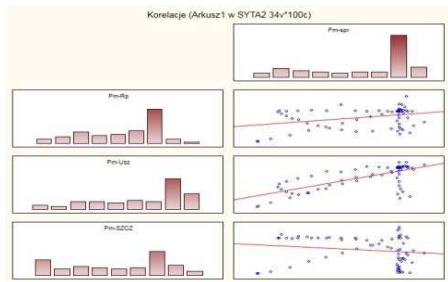
Rys. 10.24. Korelacja między indukcją rozrusznika R5 sprawnego a indukcją rozrusznika R5 o zwiększonym R_p , podwieszoną szczotką i zużytą tulejką



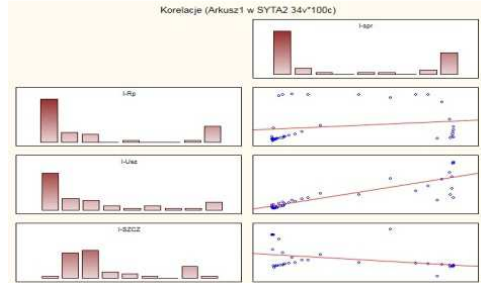
Rys. 10.25. Korelacja między mocą elektryczną rozrusznika R5 sprawnego, a mocą elektryczną rozrusznika R5 o zwiększonym R_p , podwieszoną szczotką i zużytą tulejką



Rys. 10.26. Korelacja między momentem rozrusznika R5 sprawnego, a momentem rozrusznika R5 o zwiększonym R_p , podwieszoną szczotką i zużytą tulejką



Rys. 10.27. Korelacja między mocą mechaniczną rozrusznika R5 sprawnego, a mocą mechaniczną rozrusznika R5 o zwiększonym R_p , podwieszoną szczotką i zużytą tulejką



Rys. 10.28. Korelacja między prądem rozrusznika R5 sprawnego, a prądem rozrusznika R5 o zwiększonym R_p , podwieszoną szczotką i zużytą tulejką

Porównując zależności mocy elektrycznej w funkcji prądu i indukcji można zauważyć zmianę wypukłości poszczególnych sygnałów dla sprawnego (rys. 10.1) oraz dla uszkodzenia w postaci zużytej tulejki (rys. 10.3). W przypadku mocy elektrycznej w funkcji prądu i indukcji bez uszkodzenia (rys. 10.1) widoczny jest łagodny i symetryczny przebieg zależności między poszczególnymi wielkościami. Dla uszkodzenia w postaci podwieszonej szczotki przebieg napięcia w funkcji prądu i indukcji rozrusznika występuje maksimum lokalne niewłaściwe.

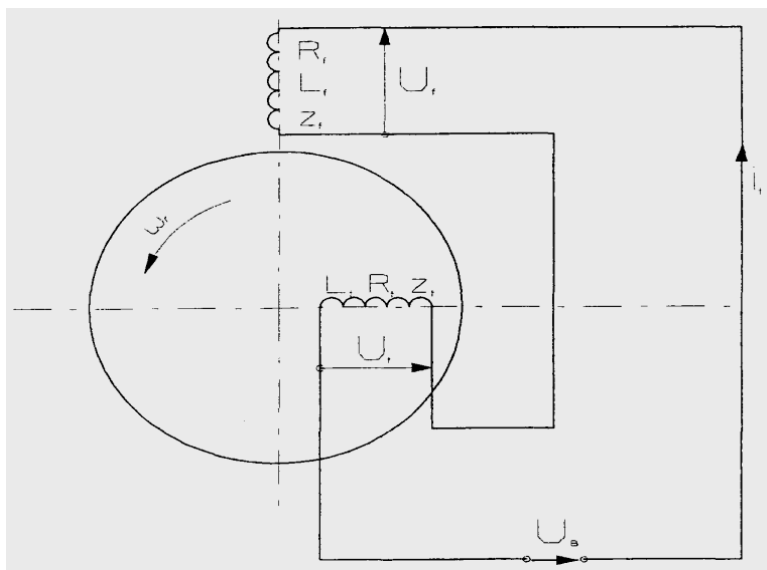
Analizując współczynniki Spearmana korelacji rang dwóch zmiennych, które mierzą zależność między nimi można zauważyć, że występuje korelacja dodatnia między napięciem, a indukcją rozrusznika z podwieszoną szczotką, z zużytą tulejką oraz dla sprawnego rozrusznika o współczynniku 0,85. Natomiast korelacja między napięciem a prądem rozrusznika sprawnego, z podwieszoną szczotką i z zużytą tulejką jest mniejsza i przyjmuje ujemne wartości i wynosi 0,98.

11. Analiza prądu rozruchu silnika spalinowego

11.1 Model prądu rozruchu

Równania obwodu elektrycznego rozrusznika samochodowego.

Podstawą do sformułowania modelu matematycznego w ujęciu teorii obwodów, jest schemat ideowy szeregowego silnika prądu stałego (rys.11.1).



Rys. 11.1. Schemat ideowy szeregowego silnika prądu stałego [6]

Z rys. 11.1 wynika następujące ogólne równanie napięciowe:

$$U_B = (R_t + R_f) \cdot i_t(t) + \frac{d\psi_t}{dt} + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (11.1)$$

przy czym:

- U_B – napięcie zasilania (na zaciskach akumulatora),
- R_t – rezystancja uzwojenia twornika [Ω],
- R_f – rezystancja uzwojenia wzbudzenia [Ω],
- Ψ_t – strumień skojarzony z uzwojeniem twornika [Wb],
- Ψ_f – strumień skojarzony z uzwojeniem wzbudzenia [Wb],
- $d\Psi_t/dt$ – napięcie indukowane w uzwojeniach twornika [V],
- $d\Psi_f/dt$ – napięcie indukowane w uzwojeniu wzbudzenia [V],
- i_t – prąd twornika [A].

Rozrusznik zasilany jest z akumulatora, którego napięcie nawet w stanie pełnego naładowania maleje, podczas pełnego obciążania go udarowym prądem rozruchowym do wartości (0,6–0,7) napięcia znamionowego. Napięcie rozładowania w funkcji prądu obciążenia można aproksymować następującą funkcją liniową:

$$U_B = E_B - R_B \cdot i_t \quad (11.2)$$

gdzie:

$E_B = 6 \times E_{B0}$ – siła elektromotoryczna nieobciążonego akumulatora [V],

R_B – rezystancja wewnętrzna akumulatora [Ω],

E_{B0} – siła elektromotoryczna jednego ogniwa akumulatora w temperaturze otoczenia (293 K) [V].

Siłę elektromotoryczną jednego ogniwa w zależności od stężenia elektrolitu określa wzór:

$$E_{B0} = 1,85 + 0,917 \cdot (\gamma_{20} - 1) \quad [V] \quad (11.3)$$

lub wzór Gałkina:

$$E_{B0} = 0,84 + \gamma_{20} \quad [V] \quad (11.4)$$

gdzie:

γ_{20} – gęstość elektrolitu w temp. odniesienia 293 K (+20°C), [g/cm³].

Występująca we wzorze 11.2. rezystancja wewnętrzna akumulatora (R_B) zależy od:

1. stanu w jakim znajduje się akumulator, tzn. od stopnia naładowania akumulatora,
2. temperatury elektrolitu,
3. konstrukcji akumulatora, tj. od:
 - odległości między płytowych w ogniwie,
 - rodzaju separatorów,
 - liczby płyt w ogniwie,
 - łączników między ogniwowymi.

Ponieważ płyty czynne ogniwa są połączone równolegle, to ze wzrostem liczby płyt, a więc ze wzrostem pojemności, maleje rezystancja wewnętrzna ogniwa.

Przyjmuje się rezystancję wewnętrzną akumulatora jako odwrotnie proporcjonalną do jego pojemności znamionowej. Zgodnie ze wzorem:

$$R_B = \frac{U_{zn}}{(17,1 \cdot Q_{bat})} \quad (11.5)$$

gdzie:

U_{zn} – znamionowe napięcie akumulatora [V],

Q_{bat} – 20 – godzinna pojemność akumulatora [Ah].

Rozruszniki samochodowe są maszynami elektrycznymi wykorzystanymi pod względem elektromagnetycznym, mają nasycony obwód magnetyczny. Z tego względu w równaniu napięcie nie można przyjmować stałych wartości indukcyjności, należy operować strumieniami skojarzonymi.

Strumień magnetyczny w ogólnym przypadku może ulegać zmianie w czasie (t), poza tym może mieć miejsce ruch względny obwodu elektrycznego w stosunku do wiązki strumienia skojarzonego:

$$\psi = f(t, x) \quad [\text{Wb}] \quad (11.6)$$

Dla stanów przejściowych w rozruszniku strumień skojarzony twornika posiada postać:

$$\psi_t = z_t \cdot \phi(i_t, x) \quad [\text{Wb}] \quad (11.7)$$

W związku z powyższym:

$$\frac{d\psi_t}{dt} = z_t \cdot \frac{d\phi_t}{dt} = z_t \cdot \left(\frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} \cdot \frac{di_t}{dt} + \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (11.8)$$

gdzie:

$x = \varphi(t)$ – względne przemieszczenie obwodu twornika w stosunku do wiązki strumienia skojarzonego,

z_t – liczba zwojów uzwojenia twornika,

ϕ_t – główny strumień magnetyczny obwodu twornika [Wb].

Stwierdzono, że przebiegi strumienia magnetycznego twornika $\phi_t = f(i_t)$ dla różnych wartości prędkości obrotowych pokrywają się ze sobą.

Pierwszy składnik wzoru 11.8. $z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} \cdot \frac{di_t}{dt}$ opisuje spadek napięcia na indukcyjności obwodu twornika. Indukcyjność ta $z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t}$ zależna jest więc od strumienia magnetycznego twornika wzbudzonego przez prąd przepływający w uzwojeniu twornika. Natomiast drugi składnik wzoru 11.8. $z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}$ wynika z faktu, że obwód elektryczny twornika porusza się w stosunku do wiązki strumienia magnetycznego, przy czym:

$$\frac{dx}{dt} = v \quad \text{– prędkość poruszania się obwodu elektrycznego twornika.}$$

Wyrażenie $z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}$ jest siłą elektromotoryczną rotacji SEM wzbudzoną w tworniku i można ją zapisać:

$$z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = e = \frac{N \cdot p}{a} \cdot \phi_t \cdot n \quad [\text{V}] \quad (11.9)$$

gdzie:

$$c_N = \frac{N \cdot p}{a} \quad \text{– stała konstrukcyjna maszyny,}$$

N – liczba prętów czynnych maszyny,

p – liczba par biegunów,

a – liczba par gałęzi równoległych uzwojenia twornika,

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{– prędkość obrotowa wirnika [obr/s],}$$

ω – prędkość kątowna twornika [1/s],

stąd:

$$z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = c_N \cdot \phi_t \cdot n = \frac{c_N}{2\pi} \cdot \phi_t \cdot \omega = c_E \cdot \phi_t \cdot \omega \quad [\text{V}] \quad (11.10)$$

przy czym:

$$c_E = \frac{N \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

Na podstawie równań 11.8 i 11.10 określa się napięcie indukowane w uzwojeniu twornika, szeregowej maszyny prądu stałego:

$$\frac{d\psi_t}{dt} = z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} \cdot \frac{di_t}{dt} + c_E \cdot \phi_t \cdot \omega(t) \quad (11.11)$$

Wyrażenie na strumień skojarzony z obwodem wzbudzenia, szeregowej maszyny prądu stałego posiada postać:

$$\psi_f = z_f \cdot \phi_f(i_f) \quad [\text{Wb}] \quad (11.12)$$

a stąd wynika :

$$\frac{d\psi_t}{dt} = z_f \cdot \frac{d\phi_f}{dt} = z_f \cdot \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t} \cdot \frac{di_t}{dt} \quad [\text{V}] \quad (11.13)$$

przy czym:

$i_t = f(t)$ – prąd przepływający w obwodzie wzbudzenia (dla szeregowej maszyny prądu stałego jest to prąd twornika),

z – liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia,

ϕ_f – strumień magnetyczny uzwojenia wzbudzenia [Wb].

Strumień magnetyczny uzwojenia wzbudzenia ϕ_b jest powiększony w stosunku do strumienia magnetycznego głównego o strumień rozproszenia ϕ_s tzn.:

$$\phi_f = \phi_t + \phi_s \text{ [Wb]} \quad (11.14)$$

Ze względu na nasycenie obwodu magnetycznego, indukcyjność uzwojenia wzbudzenia jest wielkością zmienną-zależną od zmian wartości strumienia wzbudzenia. Wszystkie parametry indukcyjne rozrusznika samochodowego są nieliniowymi funkcjami prądu obciążenia. Uwzględniając zależności 11.2, 11.11 oraz 11.13 we wzorze 11.15 otrzymuje się następującą postać równania elektrycznego.

$$E_B = (R_t + R_f + R_B) \cdot i_t(t) + (z_t \cdot \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + z_t \cdot \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t}) \cdot \frac{di_t}{dt} + c_E \cdot \phi_t \cdot \omega(t) \quad (11.15)$$

Układ mechaniczny, jakim jest wirnik rozrusznika, przekładnia zębata, układ korbowo – tłokowy, posiada jeden stopień swobody. Dlatego też można opisać go jednym równaniem redukując wszystkie siły i momenty do osi wirnika rozrusznika [1, 4, 154–157]. Podstawą do ustalania postaci równania jest wzór 11.16 wynikający z zasady zachowania energii mechanicznej:

$$\frac{dE}{dt} = N \quad (11.16)$$

E – energia mechaniczna całego układu,

N – wypadkowa moc sił napędowych i oporowych,

$$E = \frac{I \omega_r^2}{2} \quad (11.17)$$

$$N = M \cdot \omega_r \quad (11.18)$$

gdzie:

I – wypadkowy moment bezwładności wszystkich mas będących w ruchu zredukowany na oś rozrusznika,

M – wypadkowy moment sił napędowych i oporowych zredukowany na oś rozrusznika,

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{I \omega_r^2}{2} \right) = M \cdot \omega_r \quad (11.19)$$

czyli:

$$\frac{dI}{d\varphi_r} \cdot \frac{\omega_r^2}{2} + \frac{d\omega_r}{dt} \cdot I = M_e + M_{opr} + M_{str} \quad (11.20)$$

M_e – moment magnetyczny wytworzony w rozruszniku,

M_{opr} – moment oporowy silnika, zredukowany do osi rozrusznika,

M_{str} – moment strat mechanicznych i magnetycznych rozrusznika,

φ_r – kąt obrotu wirnika rozrusznika.

Uwzględniając równanie 11.15 oraz 11.20, można przedstawić układ równań różniczkowych, opisujących w dowolnej chwili czasu, proces rozruchu silnika spalinowego:

$$\begin{cases} U - c_E \cdot \phi_t \cdot \omega_r - (z_t \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + z_w \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t}) \cdot \frac{di_t}{dt} = U_s + (R_t + R_w) \cdot i \\ M_e - M_{opr} - M_{str} = \frac{dI}{d\varphi_r} \cdot \frac{\omega_r^2}{2} + \frac{d\omega_r}{dt} \cdot I \end{cases} \quad (11.21)$$

Powyższy układ równań można zapisać w postaci:

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i(t, \dots, y_m) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11.22)$$

z warunkami początkowymi:

$$t = 0 \quad x_i = x_{i0}$$

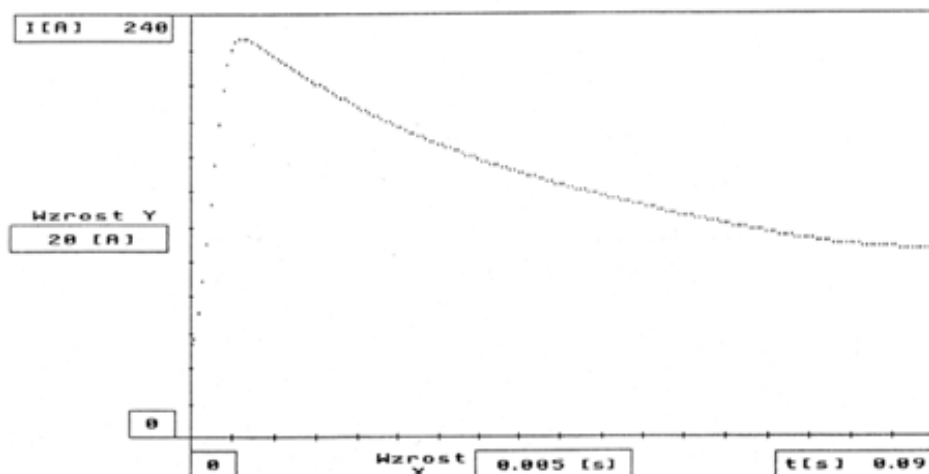
y_i – szukane funkcje,

m – ilość szukanych funkcji,

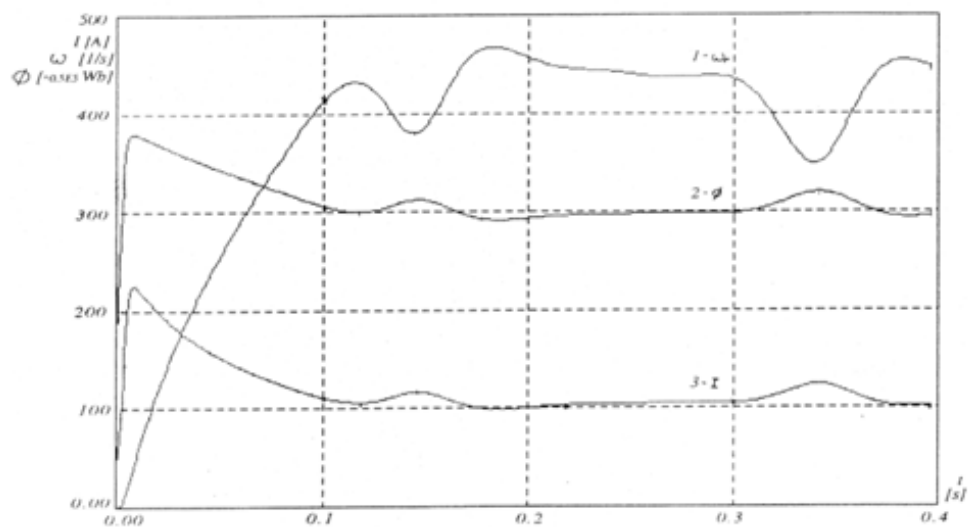
t – zmienna niezależna.

Do rozwiązywania układu równań różniczkowych, został napisany program w środowisku Matlab na podstawie którego otrzymano przebiegi prędkości kątowej, strumienia magnetycznego oraz prądu, przedstawione na rys. 11.3.

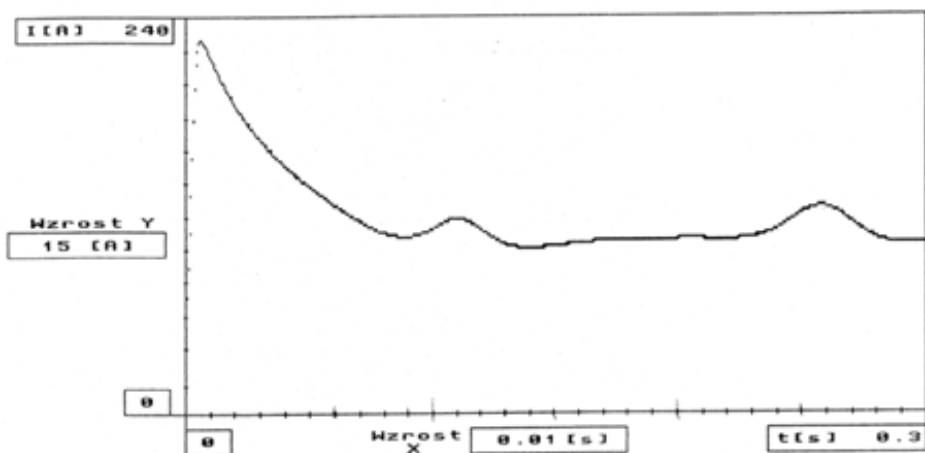
W pracy, analizowany jest prąd pobierany przez rozrusznik podczas włączania. Symulacja prądu rozruchu, przeprowadzona na komputerze PC, jest zbliżona, do otrzymanej w wyniku pomiarów bezpośrednich. Korzystając z danych otrzymanych z powyższego programu, dotyczących prądu rozruchu w funkcji czasu, przeanalizowano krzywą $I = f(t)$. Po wprowadzeniu danych do programu „Rozrusznik.exe”, wykreślono przebiegi. Na rys. 11.2, przedstawiona jest wartość zmian prądu w trakcie rozruchu, otrzymana w wyniku komputerowej symulacji. Na uwagę zasługuje pierwsza część wykresu, która przedstawia maksymalny wzrost prądu (rys. 11.4).



Rys. 11.2. Wykres zmian prądu pobieranego przez rozrusznik w funkcji czasu



Rys. 11.3. Rozwiązanie układu równań różniczkowych (1 – prędkość kątowa, 2 – strumień magnetyczny, 3 – przebieg prądu)



Rys. 11.4. Początkowa faza rozruchu

Mając daną funkcję przybliżającą prąd rozruchu, można obliczyć całkę oznaczoną, w przedziale czasu (0–0,09) [s]. Wielkość prądu rozruchu może być parametrem charakterystycznym, dla różnych uszkodzeń rozrusznika, co potwierdzono w części badawczej pracy.

W ramach eksperymentalnych badań przeprowadzono rejestrację parametrów obwodu rozruchowego za pomocą aparatury firmy BOSCH FSA 740. Wykorzystując urządzenie FSA wykonano pomiary prądu rozruchu oraz pośredni pomiar ciśnienia w poszczególnych cylindrach.

11.2. Wykorzystanie algorytmu obliczania momentu oporowego silnika spalinowego na podstawie zarejestrowanych przebiegów elektromechanicznych rozrusznika

Badany pojazd powinien być wyposażony w zestaw czujników, połączonych z komputerem przez blok przetworników analogowo-cyfrowych i układ kondycjonujący sygnały. Zadaniem komputera jest analizowanie zmierzonych wielkości i porównanie ich na bieżąco z wartościami zapisanymi w pamięci.

Przy określaniu wartości momentu oporowego silnika powinien być znany stan techniczny rozrusznika. Standardowa kontrola obejmuje pomiar parametrów na biegu luzem, przy zwarcu oraz przy pełnym obciążeniu. Aby możliwe było przeprowadzenie tych pomiarów bez demontażu silnika, konieczne jest instalowanie w rozruszniku czujników do pomiaru prędkości kątowej wirnika oraz indukcji w szczelinie przytwornikowej. Uzyskane wartości sygnałów w poszczególnych próbach analizowane są przez komputer, a ich pozytywny wynik daje możliwość określenia momentu oporowego silnika

spalinowego na podstawie układu równań różniczkowych 11.21. Wbudowanie na stałe w rozruszniku czujnika mierzącego wielkość indukcji w szczelinie przytworNIKOWEJ pozwala zrezygnować z pierwszego równania układu 11.21, tym samym uniknąć błędu związanego między innymi ze zmianą rezystancji uzwojenia stojana i twornika powodowanych ciągłym nagrzewaniem i stygnięciem w czasie prób rozruchu. Moment oporowy silnika może być wyliczony tylko na podstawie II równania układu 11.21.

$$M_{OP} = p\eta(c\Phi_{(i)}i - M_{str} - \varepsilon_r I - \frac{\omega_r^2}{2} I) \quad (11.23)$$

Moment oporowy danego typu silnika można przedstawić funkcją:

$$M_{OP} = M_{OP}(\omega, T_s, p, \varphi) = M_{OP}(\omega, T_s, p(\omega, T_o, p_o, T_s, s), \varphi) \quad (11.24)$$

ω – prędkość kątowna

T_s – temperatura silnika,

p – ciśnienie nad denkiem tłoka,

φ – kąt określający położenie wału korbowego,

T_o – temperatura otoczenia,

p_o – ciśnienie otoczenia,

s – stan techniczny przestrzeni roboczych oraz osprzętu.

Z równania 11.23. wynika, że bardzo wiele czynników wpływa na wartość M_{OP} . Aby możliwe było ustalenie zmian stanu technicznego s , konieczne jest zachowanie niezmiennych pozostałych parametrów. Dlatego, aby moment oporowy mógł być wykorzystany w diagnostyce, konieczne jest spełnienie przy jego określaniu takich samych warunków jak przy pomiarze ciśnienia sprężania:

- silnik nagrzany do temperatury eksploatacyjnej,
- wyregulowane luzy zaworowe,
- całkowicie otwarta przepustnica mieszanki,
- stała średnia prędkość obrotowa wału korbowego.

Z wyżej wymienionych czynników dużą rolę w dokładności pomiarów odgrywa prędkość obrotowa wału korbowego i jej wpływ na ciśnienie sprężania, a więc i moment oporowy który jest największy dla prędkości rozruchowych.

Ponieważ akumulator rozruchowy pojazdu nie zapewnia stałej prędkości obrotowej wału korbowego, aby porównać wyniki pomiarów momentu oporowego dla różnych silników konieczne jest zastosowanie urządzenia zapewniającego „nieograniczony” dopływ energii do rozrusznika oraz nadającego stałą średnią prędkość obrotową wału korbowego przy stałym napięciu zasilania np. ZTR 80.

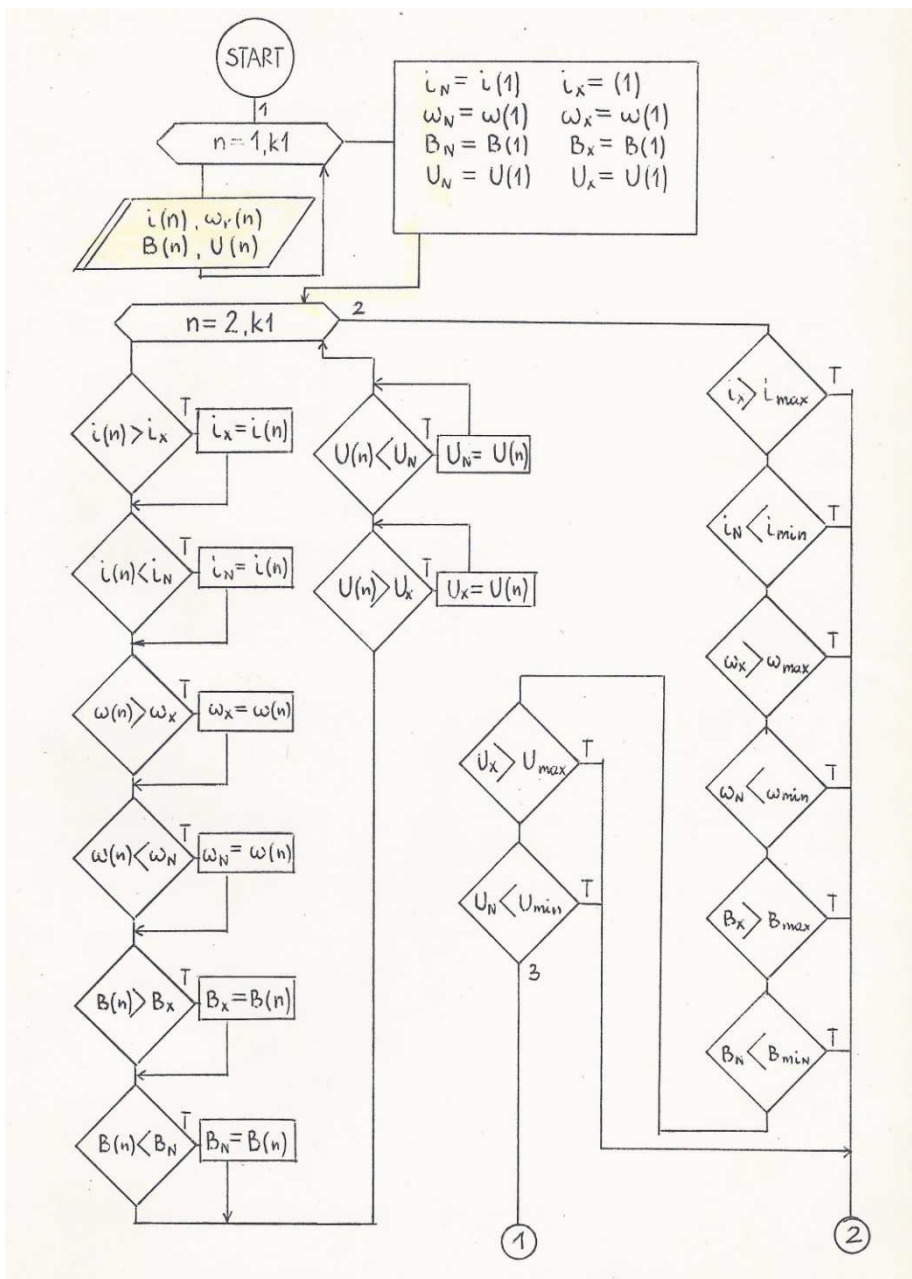
Pomiar momentu oporowego silnika może być realizowany przez komputerowy zestaw pomiarowy zbierający informacje z badanego silnika podczas próby rozruchu rozrusznikiem. Czynności jakie powinny być wykonane przez operatora diagnostę i zestaw pomiarowy zostały przedstawione w tab. 11.1.

Rysunki 11.5–11.8 przedstawiają algorytm diagnozowania stanu technicznego silnika spalinowego w oparciu o zarejestrowane przebiegi prądu, napięcia, prędkości obrotowej i indukcji w szczelinie przytworNIKOWEJ

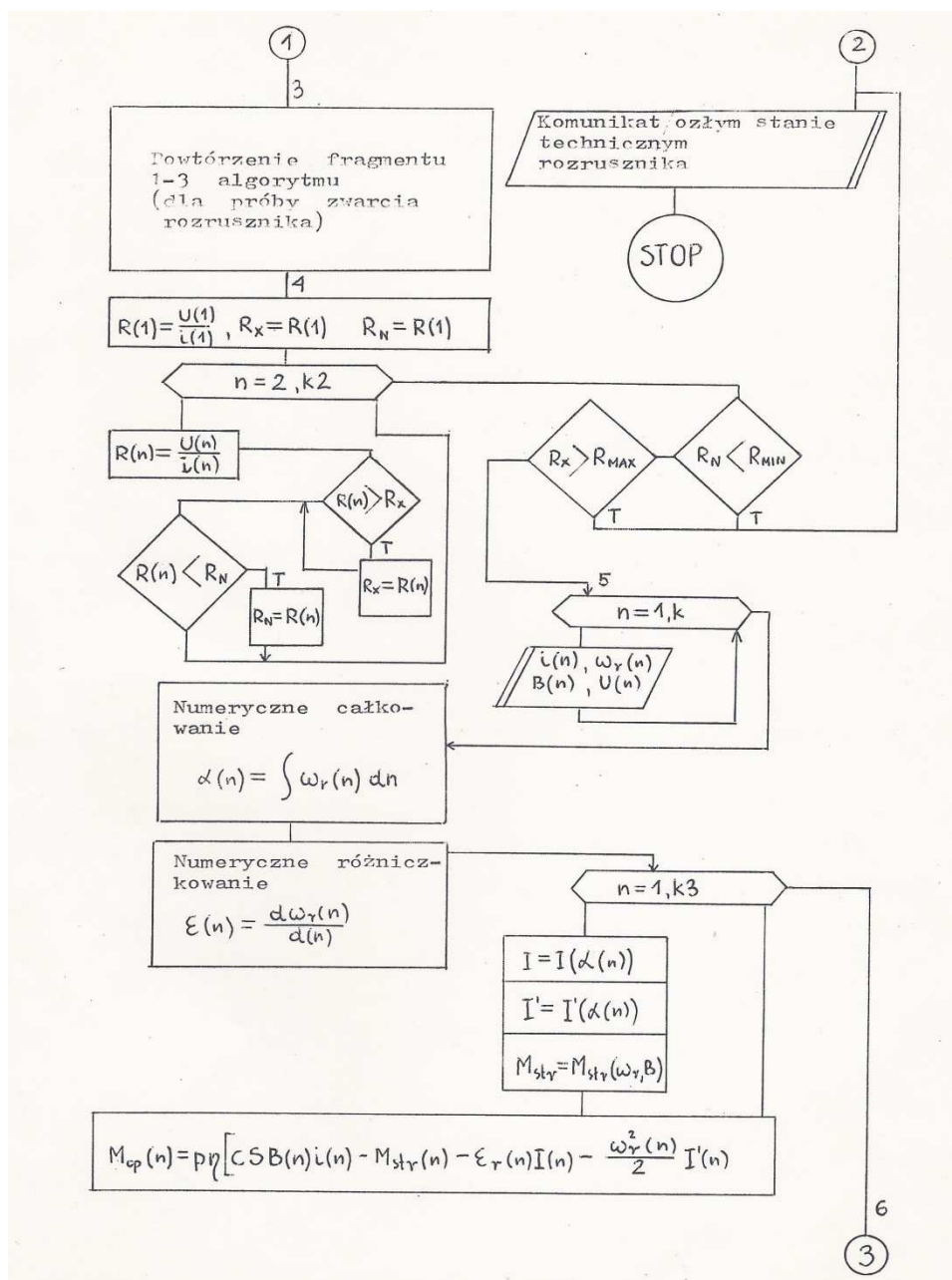
rozrusznika. Pierwsza część 1–3 algorytmu odpowiada próbie biegu jałowego. Analiza zarejestrowanych przebiegów polega na odszukaniu 1–2 wielkości minimalnych i maksymalnych oraz porównaniu 2–3 z wielkościami wzorcowymi. W przypadku niezgodności wyprowadzony zostaje komunikat o złym stanie technicznym rozrusznika. Fragment 3–4 dotyczy próby zwarcia i jest identyczny jak 1–3. W części 4–5 wyliczana i porównywana jest rezystancja uzwojeń. W przypadku pozytywnej oceny stanu technicznego rozrusznika realizowana jest kolejna część programu, tj. rejestracja przebiegów podczas obracania wału korbowego dla ustalonego stanu. Fragment 5–6 wylicza przebieg momentu oporowego w oparciu o wzór 11.23. Maksymalne uśrednione wartości dla poszczególnych cylindrów obliczane są w części 6–8, a w części 8–9 porównywane z wartościami wzorcowymi dla danej temperatury i ciśnienia otoczenia.

Tab.11.1. Wykaz czynności wykonywanych przez diagnostę podczas diagnozowania stanu technicznego silnika

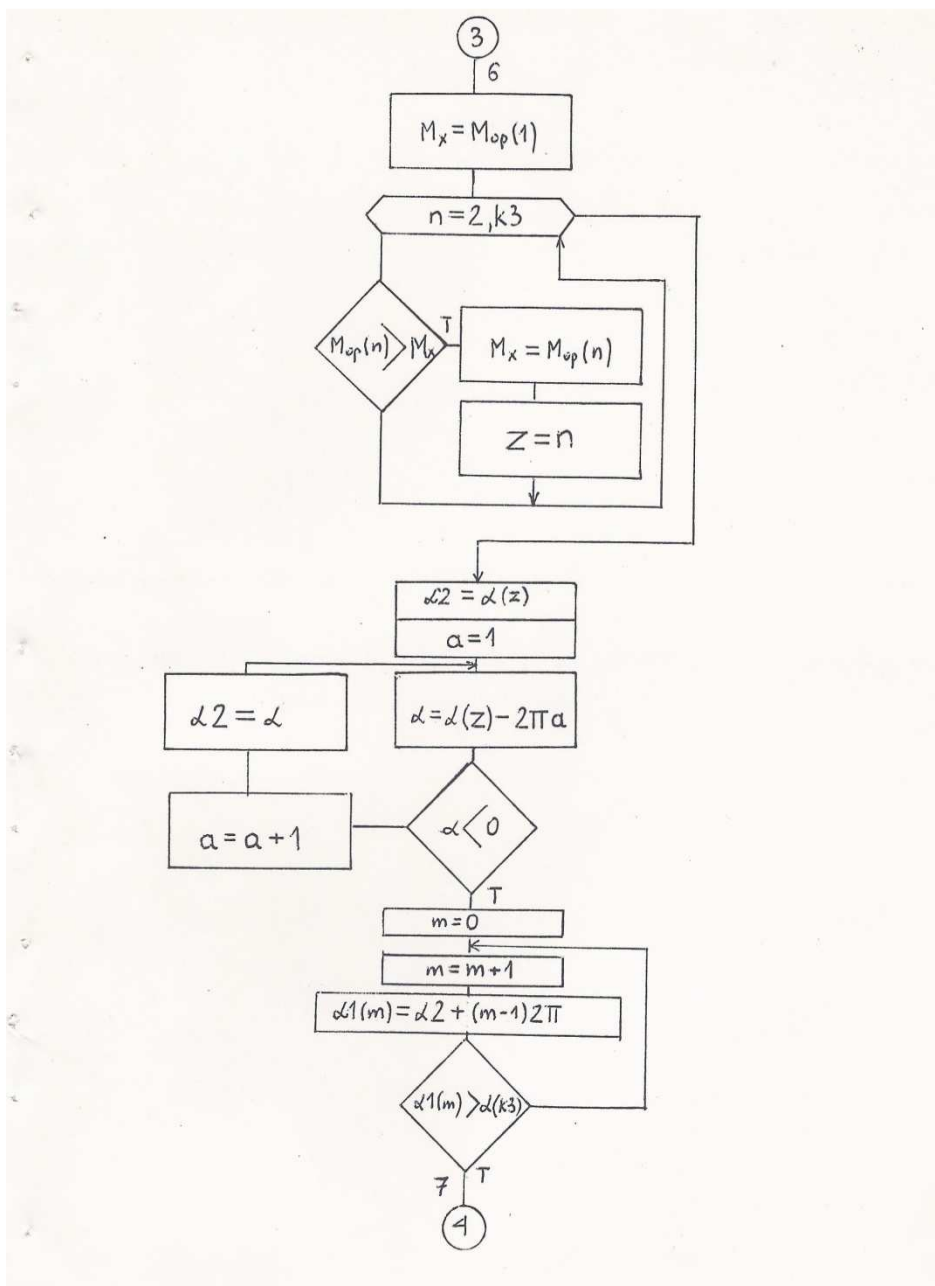
Sprawdzenie warunków pomiaru	– silnik nagrany do temp. eksploatacyjnej – uregulowane luzy zaworowe – całkowicie otwarta przepustnica mieszanki		
Wykonanie czynności przygotowawczych	– odłączenie przewodu wysokiego napięcia cewki zapłonowej – połączenie zacisków rozrusznika z urządzeniem zasilającym – połączenie czujników rozrusznika z zestawem pomiarowym		
Sprawdzenie stanu technicznego rozrusznika	Próba biegu jałowego	– pomiar i rejestracja natężenia prądu, napięcia, zasilania, indukcji w szczelinie powietrz., prędk. kątowej – porównanie zarejestrowanych wartości ekstremalnych z wzorcowymi	Wydanie opinii o stanie technicznym rozrusznika
	Próba zwarcia	– zablokowanie wału korbowego – pomiar i rejestracja natężenia, napięcia i indukcji w szczelinie przytwornikowej, – porównanie ekstremalnych zarejestrowanych wartości z wzorcowymi – odblokowanie wału korbowego	
Sprawdzenie stanu technicznego przestrzeni roboczych silnika	– pomiar i rejestracja napięcia, natężenia, indukcji w szczelinie przytwornikowej, prędkości kątowej rozrusznika dla rozruchu ustalonego – wyliczenie przebiegu momentu oporowego badanego silnika – wyliczenie średnich maksymalnych momentów oporowych dla poszczególnych cylindrów oraz porównanie z wartościami wzorcowymi		Wydanie opinii o stanie technicznym przestrzeni roboczych silnika



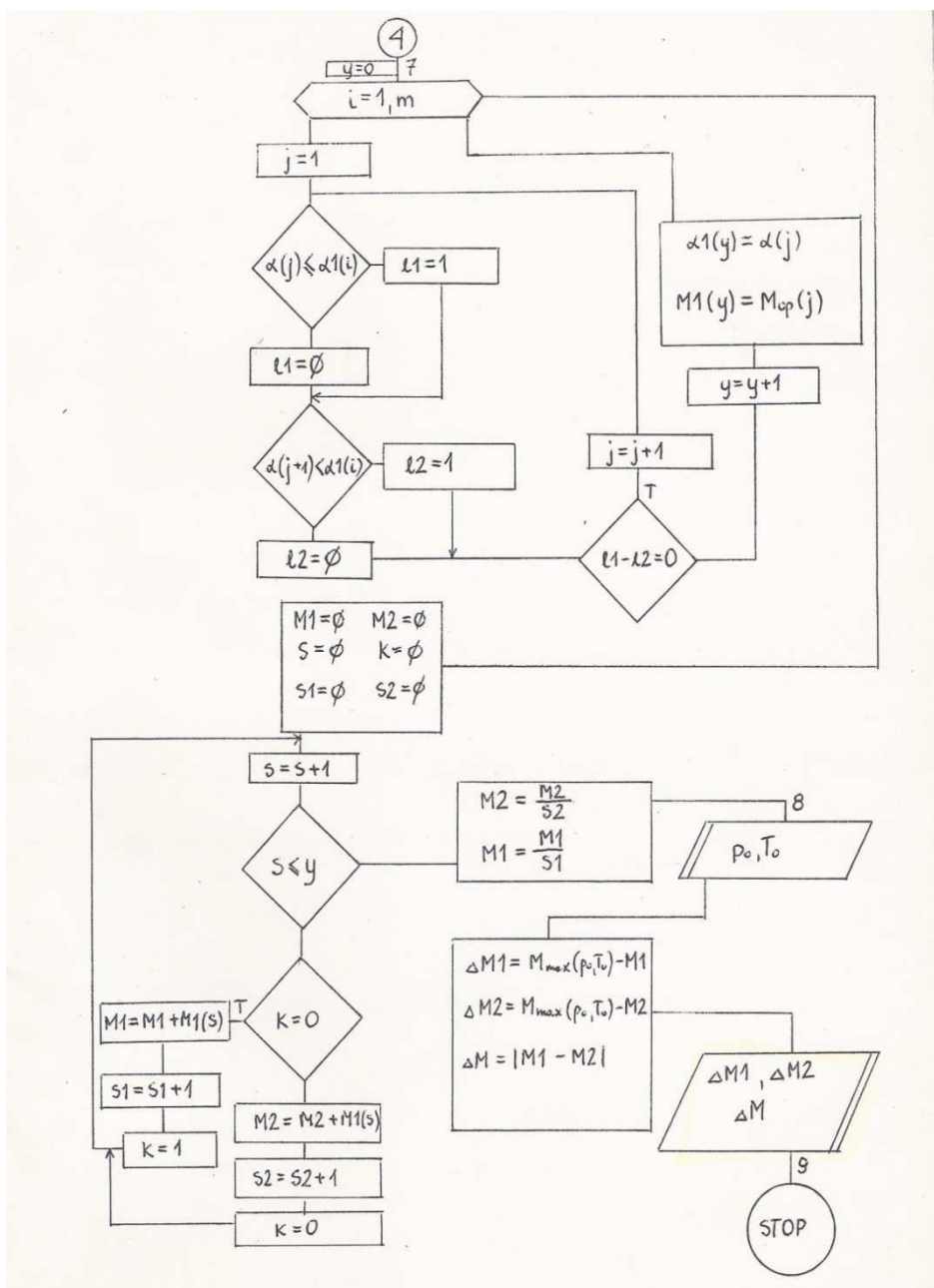
Rys. 11.5. Algorytm diagnozowania stanu technicznego silnika spalinowego w oparciu o zarejestrowane przebiegi prądu, napięcia, prędkości obrotowej i indukcji w szczelinie przytwornikowej rozrusznika



Rys. 11.6. Algorytm diagnozowania stanu technicznego silnika spalinowego w oparciu o zarejestrowane przebiegi prądu, napięcia, prędkości obrotowej i indukcji w szczelinie przytwornikowej rozrusznika



Rys. 11.7. Algorytm diagnozowania stanu technicznego silnika spalinowego w oparciu o zarejestrowane przebiegi prądu, napięcia, prędkości obrotowej i indukcji w szczelinie przytwornikowej rozrusznika



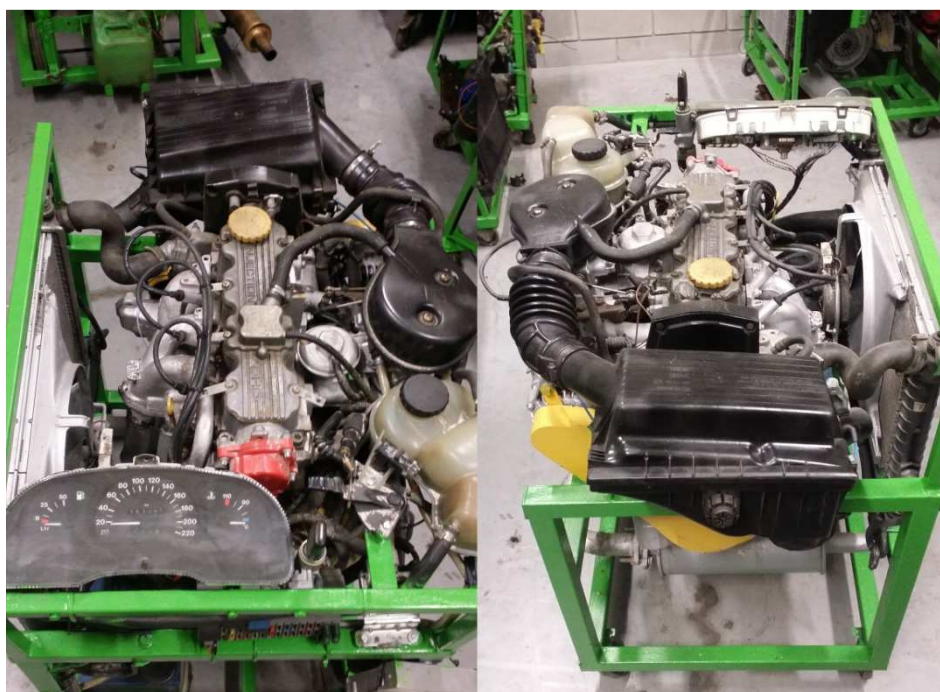
Rys. 11.8. Algorytm diagnozowania stanu technicznego silnika spalinowego w oparciu o zarejestrowane przebiegi prądu, napięcia, prędkości obrotowej i indukcji w szczelinie przytwornikowej rozrusznika

11.3. Przeprowadzenie badań weryfikacyjnych prądu rozruchu

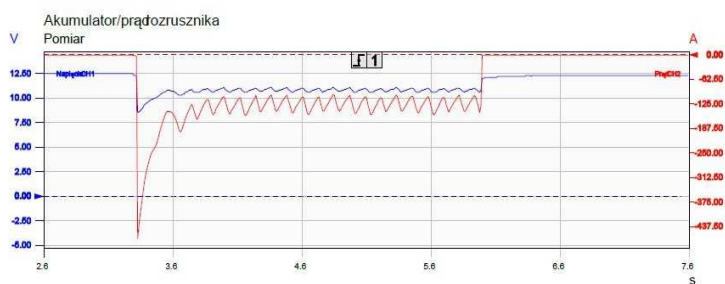
11.3.1. Wyniki pomiarów prądu rozruchu dla silnika Opla, wtrysk MULTEC jednopunktowy

Charakterystyka prądu rozruchu została zarejestrowana dla silnika Opla (rys. 11.9) w fazie rozruchu, pozostałe pomiary prądu rozruchowego zarejestrowano dla silnika przy rozłączonym obwodzie pompy paliwa dla następujących stanów:

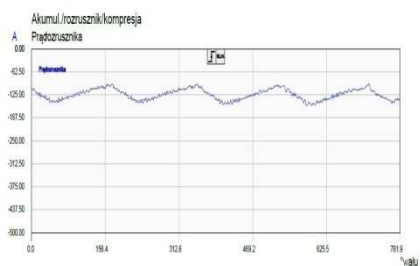
1. Temperatura silnika 24,8°C i wszystkich świecach wkręconych (rys. 11.10–11.12);
2. Temperatura silnika 25,5°C i wykręconej I świecy (rys. 11.13–11.15);
3. Temperatura silnika 80,1°C i wykręconej I i II świecy (rys. 11.16–11.18).



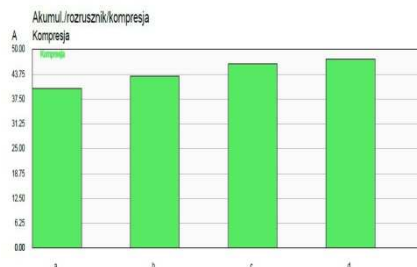
Rys. 11.9. Silnik Opla czterocylindrowy z wtryskiem jednopunktowym



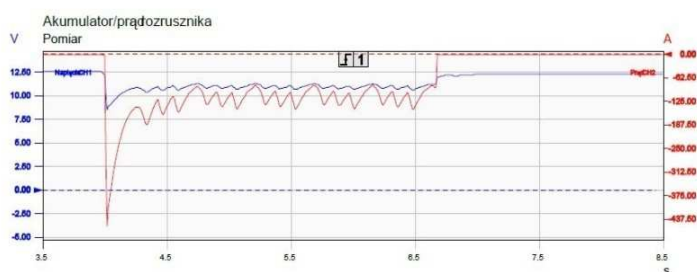
Rys. 11.10. Prąd rozrusznika przy temperaturze 24,8°C i wszystkich świecach wkręconych



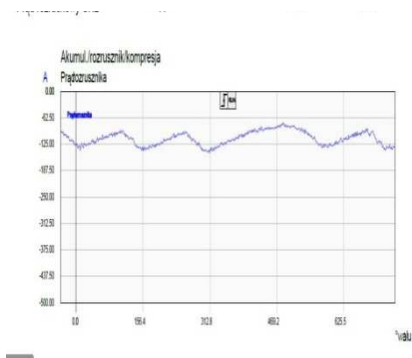
Rys. 11.11. Prąd rozruchowy przy temperaturze 24,6°C i wszystkich świecach wkręconych



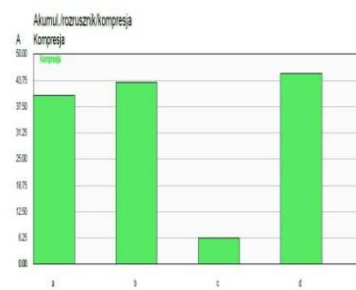
Rys. 11.12. Ciśnienie w cylindrach przy wkręconych wszystkich świecach i temperaturze 24°C



Rys. 11.13. Prąd rozrusznika przy temperaturze 25,1°C i wykręconej I świecy



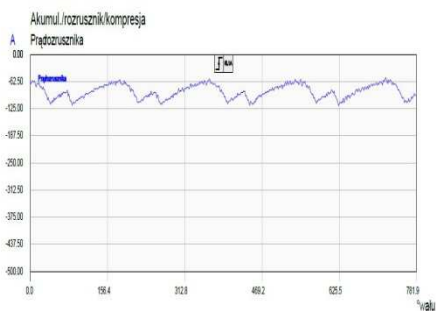
Rys. 11.14. Prąd rozruchowy przy temperaturze 25,2°C i wykręconej I świecy



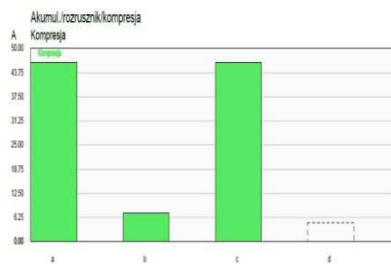
Rys. 11.15. Ciśnienie w cylindrach przy wykręconej I świecy i temperaturze 25,2°C



Rys. 11.16. Prąd rozrusznika przy temperaturze 80,1°C i wykręconej I i II świecy



Rys. 11.17. Prąd rozruchowy przy temperaturze 79,9°C i wykręconej I i II świecy

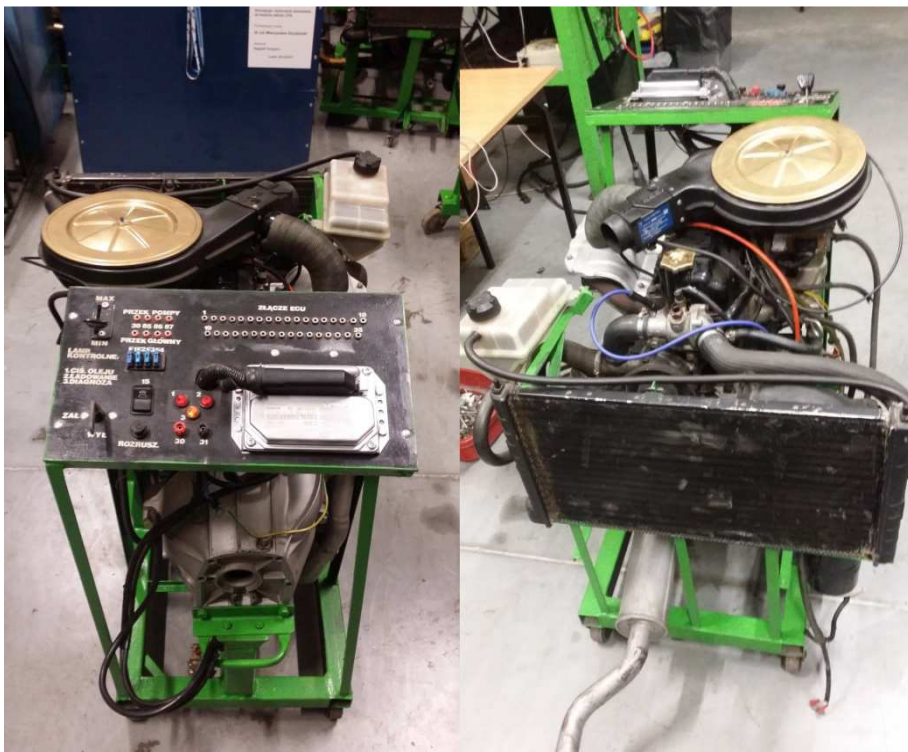


Rys. 11.18. Ciśnienie w cylindrach przy wykręconej I i II świecy i temperaturze 79,9°C

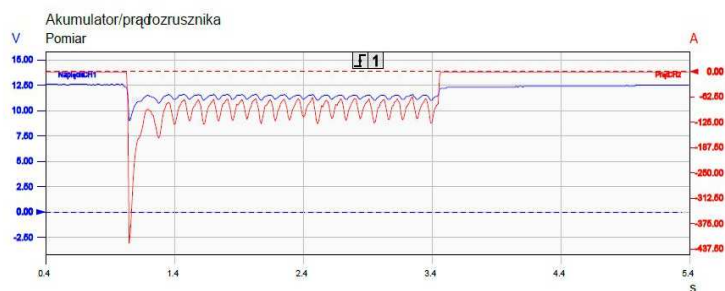
11.3.2. Wyniki pomiarów prądu rozruchu dla silnika 1500, wtrysk Bosch MA. 1.7. czterocylindrowego

Pomiary prądu rozrusznika dla silnika 1500, wtrysk MA 1.7. cztero cylindrowego (rys. 11.19) przeprowadzono dla następujących stanów:

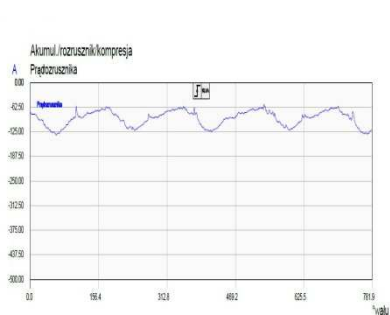
1. Temperatura silnika 27,4°C i wkręconych wszystkich świecach (rys. 11.20–11.22);
 2. Temperatura silnika 25,5°C i wykręconej I świecy (rys.11.23–11.25);
 3. Temperatura silnika 25,2°C i wykręconej I i III świecy (rys. 11.26–11.28).
- Zestawienie wyników pomiarów dla czterech silników przedstawia tabela 11.2.



Rys. 11.19. Silnik Poloneza 1500 czterocylindrowy



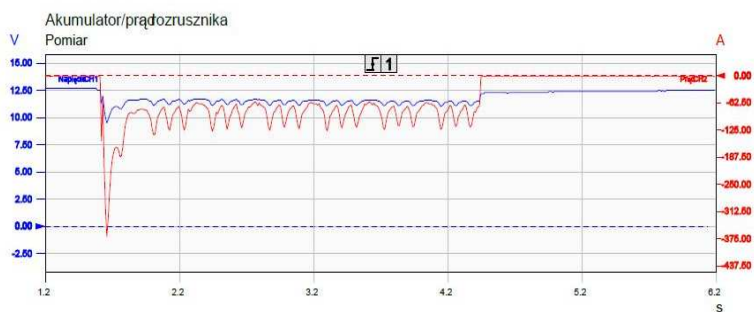
Rys. 11.20. Prąd rozrusznika przy temperaturze $27,4^{\circ}\text{C}$ i wkręconych wszystkich świecach



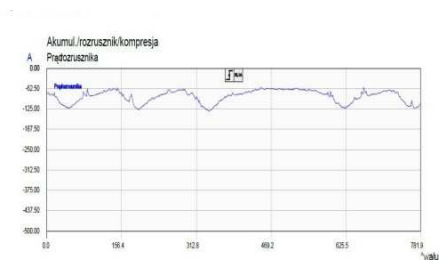
Rys. 11.21. Prąd rozruchowy przy temperaturze $23,6^{\circ}\text{C}$ i wkręconych wszystkich świecach



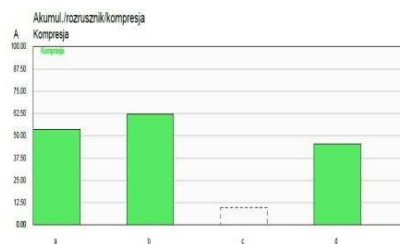
Rys. 11.22. Ciśnienie w cylindrach przy wkręconych wszystkich świecach i temperaturze $23,6^{\circ}\text{C}$



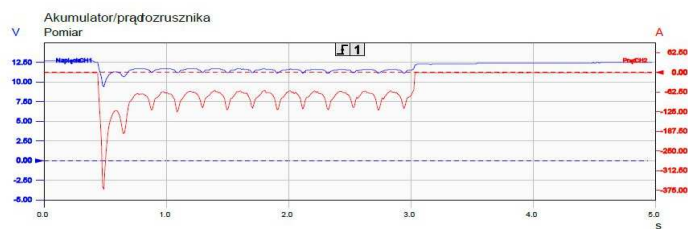
Rys. 11.23. Prąd rozrusznika przy temperaturze $25,5^{\circ}\text{C}$ i wykręconej I świecy



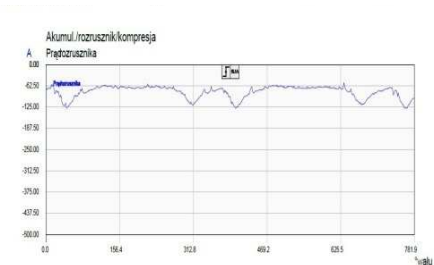
Rys. 11.24. Prąd rozruchowy przy temperaturze 23,5°C i wykręconej I świecy



Rys. 11.25. Ciśnienie w cylindrach przy wykręconej I świecy i temperaturze 23,5°C



Rys. 11.26. Prąd rozrusznika przy temperaturze 25,2°C i wykręconej I i III świecy



Rys. 11.27. Prąd rozruchowy przy temperaturze 24,3°C i wykręconej I i III świecy



Rys. 11.28. Ciśnienie w cylindrach przy wykręconej I i III świecy i temperaturze 24,3°C

Tab.11.2. Zestawienie wyników pomiarów prądu rozruchu

Pomiary prądu rozruchu dla 4 silników spalinowych								
Rodzaj uszkodzenia	Pomiar prądu przy rozruchu silnika				Pomiar prądu przy pomiarze ciśnienia sprężania			
	U [V]	I [A]	P [kW]	T [°C]	U [V]	I [A]	n [obr./min.]	T [°C]
Silnik Opel, wtrysk MULTEC jednopunktowy								
komplet świec	13,6/9	463	2,02	29,5	–	–	–	–
	12,5/8,5	468	1,51	24,8	10,9	125,7	245	24,6
	13,1/9	514	1,45	52,2	11,6	112	291	50,3
	13/9	497	1,51	83,8	11,6	110,9	294	81,9
brak 1 świecy	12,6/8,5	455	1,4	25,1	11	112	255	25,2
	12,7/8,7	496	1,41	81,6	11,6	101,4	305	81,4
brak 1 i 3 świecy	12,4/8,3	427	1,25	25,5	11	97,2	128	25,4
brak 1 i 4 świecy	12,6/8,5	437	1,24	25,8	11	98,7	131	25,9
brak 1 i 2 świecy	12,8/8,7	511	1,21	80,1	11,7	86,6	121	79,9
Silnik 1500, BOSCH MA 1.7.								
komplet świec	12,6/9	424	1,12	27,4	12	90,8	269	23,6
brak 1 świecy	12,7/9,5	370	1,06	25,5	11,5	85,6	276	23,5
brak 1 i 3 świecy	12,7/9,4	372	1	25,2	11,5	80,3	140	24,3
brak 1 i 4 świecy	12,7/9,4	372	1	25,2	–	–	–	–
Silnik Opel, wtrysk BOSCH ML 4.1.								
komplet świec	12,8/9,9	345	1,47	24,2	11	135,2	238	24,2
brak 1 świecy	12,4/10	309	1,38	24,2	11,1	125,7	231	24,2
brak 1 i 2 świecy	12,5/9,6	321	1,01	24,2	11,2	112	229	24,2
brak 1 i 4 świecy	12,6/9,8	318	1,27	24,2	11,1	114,1	271	24,2
Silnik Fiata Seicento								
komplet świec	–	–	–	–	12,1	76,1	319	23,8
brak 1 świecy	–	–	–	–	11,4	71,8	328	23,8
brak 4 świec	–	–	–	–	12	57,1	190	51,6
brak 4 świec	–	–	–	–	14	64,5	378	83,8

12. Podsumowanie

Przedstawiona w rozprawie problematyka dozoru eksploatacyjnego obwodu rozruchowego pojazdów samochodowych wskazuje, że podstawowe cele pracy zostały zrealizowane. Rozważania będące treścią tej rozprawy można podzielić na cztery grupy zagadnień, które wymagały szerszego omówienia i oceny. Można je ująć w następujący sposób:

1. Przedstawienie w sposób uporządkowany całokształtu zagadnień teoretycznych i praktycznych związanych z eksploatacją, niezawodnością i diagnostyką obwodu rozruchowego silnika spalinowego.
2. Opracowanie analitycznych metod wyznaczania parametrów mocy rozrusznika oraz prądu rozruchu silnika spalinowego.
3. Opracowanie laboratoryjnej metody wyznaczania parametrów diagnostycznych na podstawie wybranych sygnałów diagnostycznych z wykorzystaniem pomiaru indukcji magnetycznej.
4. Opracowanie koncepcji wyznaczania momentu oporowego silnika spalinowego z wykorzystaniem sygnału indukcji magnetycznej rozrusznika.

1. Grupa zagadnień dotyczy eksploatacji i niezawodności obwodu rozruchowego:

- Głównym rozpatrywanym problemem obwodu rozruchowego było zebranie informacji o eksploatacyjnym zużyciu oraz uszkodzeniach elementów mechanicznych i elektrycznych obwodu rozruchowego.
- Drugim zagadnieniem z punktu widzenia eksploatacji była analiza uszkodzeń w funkcji przebiegu samochodu z wykorzystaniem testu Kołmogorowa.
- Kolejnym zagadnieniem było opracowanie modelu niezawodnościowego nadmiarowości obwodu rozruchowego.
- Czwartym zagadnieniem w tej grupie było przeprowadzenie analizy niezawodnościowej obwodu rozruchowego z wykorzystaniem oprogramowania Agena Risk, które umożliwiło prognozowanie stanu eksploatacyjnego obwodu rozruchowego.

2. Grupa zagadnień wiąże się z opracowaniem modeli do wyznaczania charakterystyk mocy:

- Przeprowadzona weryfikacja modelu matematycznego rozrusznika z wykorzystaniem programów Visual C++, LabView, Matlab pozwoliła potwierdzić zgodność otrzymanych charakterystyk mocy z charakterystykami podawanymi przez producenta.

- Opracowane przez autora kryteria eksploatacyjnego zużycia elementów mechanicznych i elektrycznych obwodu rozruchowego pozwoliły przy wykorzystaniu programu Matlab Simulink symulować eksploatacyjne zużycie w celu wyznaczenia charakterystyk mocy dla określonych stanów eksploatacyjnych.
 - Szczegółowa analiza parametrów rozrusznika pozwoliła autorowi z wykorzystaniem modelowania numerycznego w środowisku Matlab opracować model prądu rozruchu pozwalający wyznaczyć prąd rozruchu silnika spalinowego dla wybranych stanów eksploatacyjnych silnika spalinowego.
- 3. Grupa ta wiąże się z problematyką pomiarów sygnałów diagnostycznych generowanych przez rozrusznik z wykorzystaniem zjawiska Halla:**
- Dla weryfikacji sygnałów diagnostycznych przeprowadzona analiza parametrów funkcjonalnych (prąd, napięcie, prędkość obrotowa, moment) pozwoliła wyznaczyć charakterystyki mocy dla wybranych stanów niezdatności obiektów diagnozowania.
 - Przeprowadzona analiza indukcji magnetycznej w rozruszniku z wykorzystaniem programu QuickField pozwoliła wyznaczyć rozkład strumienia magnetycznego w rozruszniku dla wybranych zasymulowanych uszkodzeń.
 - Analiza indukcji magnetycznej została zrealizowana dla trzech przypadków: dla czujnika Halla umieszonego na wirniku, w szczelinie przytwor-nikowej oraz w szczelinie przyjarzmowej.
- 4. Grupę stanowią eksperymentalne badania umożliwiające rejestrację prądu rozruchu dla obiektów rzeczywistych w postaci silników spalinowych, na których zostały przeprowadzone badania weryfikacyjne z wykorzystaniem aparatury firmy Bosch:**
- Przeprowadzone badania dla czterech silników spalinowych pozwoliły wyznaczyć prąd rozruchu jako parametr diagnostyczny dla wybranych warunków termicznych silnika spalinowego oraz zasymulowanych szczelności układu korbowo-tłokowego.
 - Dla weryfikacji prądu rozruchu przeprowadzony test szczelności potwierdził zgodność modelu matematycznego z wynikami zarejestrowanymi przez aparaturę pomiarową.
 - Na podstawie modelu analitycznego i weryfikacji prądu rozruchu została zaproponowana przez autora metoda wyznaczenia momentu oporowego silnika spalinowego.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych autora przedstawionych w rozprawie należy wyróżnić:

1. Opracowanie modelu matematycznego obwodu rozruchowego do wyznaczania charakterystyk mocy.
2. Przeprowadzenie analizy numerycznej wpływu eksploatacyjnego zużycia elementów mechanicznych i elektrycznych obwodu rozruchowego na charakterystyki mocy.
3. Opracowanie programu prognozowania stanów niezdatności z wykorzystaniem oprogramowania AgenaRisk.
4. Wyznaczenie empirycznej funkcji niezawodności obwodu rozruchowego z wykorzystaniem testu Kołomogorowa.
5. Opracowanie analitycznej metody określania stanu zdatności obwodu rozruchowego na podstawie parametrów funkcjonalnych.
6. Opracowanie laboratoryjnej metody z wykorzystaniem środowiska LabView do rejestracji i analizy sygnałów diagnostycznych jako system diagnostyczny.
7. Zaproponowanie metody wyznaczenia momentu oporowego silnika spalinowego.

Prezentowane wieloletnie i wielowątkowe prace badawcze prowadzone w celu kompleksowej analizy symptomów diagnostycznych jako informacje pozwalające wnioskować o właściwościach obwodu rozruchowego mogą być wykorzystywane w procesie odnowy innych urządzeń elektrycznych pojazdów samochodowych.

Opracowane metody mogą być wdrożone do procesu monitorowania urządzeń elektrycznych pojazdów samochodowych w ramach diagnostyki pokładowej.

Literatura

1. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P., Jankowski R., Kowalczyk W., *Effect to the fuel system type on energy, economic and environmental indicators of the spark – ignition engine work*, „Journal of KONES Powertrain and transport”, ISSN 1231-4005, t. 21, z. 3, 2014, s. 7–14.
2. Ambrozik A., Ambrozik T., Kurczyński D., Łagowski P., *Modern experimental set – up for investigations into strategies for the control and fuelling of spark ignition engines*, „Combustion Engines”, ISSN 2300-9896, z. 3 (162), 2015, s. 1030-1035.
3. Ambrozik A., Ambrozik T., Łagowski P., *Fuel impact on emissions of harmful components of the exhaust gas from the CI engine during cold start – up*, „Eksplatacja I Niezawodność – Maintenance and Reliability”, ISSN 1507-2711, t. 17, z. 1, 2015, s. 95–99.
4. Ambrozik A., Ambrozik T., Łagowski P., Kurczyński D., *The Influence of Injection Advance Angle on Fuel Spray Parameters and Nitrogen Oxide Emissions for a Self – Ignition Engine Fed with Diesel Oil and FAME*, „Polish Journal of Environmental Studies”, ISSN 1230-1485, t. 23, z. 6, 2014, s. 1917–1923.
5. Andreux R., Fontchastagner J., Takorabet N., Labbe N., Metral J., *A general approach for brushed DC machines simulation using a dedicated field/circuit coupled method*, „Progress in Electromagnetics Research”, vol. 145, 2014, s. 213–227.
6. Baczyński D., *Metody inteligencji obliczeniowej w elektroenergetyce*, „Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, Elektryka”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISSN 0137-2319, z. 145 Warszawa 2013.
7. Banach H., *Minimalizacja strat mocy w indukcyjnych silnikach trójfazowych pracujących ze zmiennym obciążeniem*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, ISBN 978-83-62596-98-0, Lublin 2013.
8. Bay. O., Bayir R., *A fault diagnosis of engine starting system via starter motors using fuzzy logic algorithm*, „Gazi Journal Univeristy of Science”, vol. 24, Issue 3, 2011, s. 437–440.
9. Bay. O., Bayir R., *Serial wound starter motor faults diagnosis using artificial neural network*, „Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics”, 3–5 June 2004, IEEE 2004, s. 194–199.
10. Bayir R., Bay F., *Fault diagnosis in starter motors by classification of wavelet analysis results of faulty starter motor's current signals using fuzzy logic*, „J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.”, vol. 22, Gazi 2007, s. 363–374.
11. Bayir R., Bay O., *Kohonen network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors*, „International Journal Automotive Technology”, nr 6, 2005, s. 341–350.

12. 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.
13. Bernatt J., *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, „Research and Development Center of Electrical Machines. Komel”, ISBN 978-83-910585-9-6, Katowice 2010.
14. Biczek P., *Integracja rozproszonych źródeł energii w mikrosieci prądu stałego*, „Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, Elektryka”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, z. 142, ISSN 0137-2319, Warszawa 2012.
15. Biernat A., *Analiza sygnałów diagnostycznych maszyn elektrycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-458-8, Warszawa 2015.
16. Biteus J., Frisk E. and Nyberg M., *Distributed Diagnosis Using a Condensed Representation of Diagnoses With Application to an Automotive Vehicle*, „IEEE transactions on systems, man and cybernetics. Part A. Systems and humans”, vol. 41, no. 6, 2011, s. 1262–1267.
17. Błaga C., Kovacs E., *Performance Curves of Starter Based on Mathematical Model*, „Proceedings of the 2nd international conference on recent achievements in mechatronics, automation, computer science and robotics. Macro 2010”, Cientiascientia Publishing House, Cluj – Napoca 2010, s. 121–128.
18. Borkowski S., Seledak J., Salomon Sz., *Efektywność eksploatacji maszyn i urządzeń*, Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, ISBN 83-88469-14-2, Częstochowa 2006.
19. Borowik L., *Diagnostyka urządzeń elektrycznych i procesów – wybrane problemy i metody*, Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2015.
20. Bosch, *Czujniki w pojazdach samochodowych*, Praca zbiorowa, WKŁ, ISBN 978-83-206-1721-4, 2014.
21. Burcan J., Siczek K., *Trwałość i niezawodność łożysk rozrusznika*, „Tribologia”, nr 4, 2003, s. 69–78.
22. Burcan J., Świdorski W., *Niekonwencjonalne łożyskowania ślizgowe*, „Zagadnienia Eksploatacji Maszyn”, z. 4(140), 2004, s. 21–33.
23. Chalamoński M., *Diagnozowanie układów hydraulicznych maszyn roboczych*, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, ISBN 83-87274-42-9, Bydgoszcz 2000.
24. Chedot L., Friedrich G., *A dynamic model for interior permanent magnet synchronous machine Application to a starter – generator*, „Industry Applications Conference”, 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, 3–7 Oct. 2004, vol. 1.
25. Chedot L., Friedrich G., *Optimal control of interior permanent magnet synchronous integrated starter – generator*, EPE, Toulouse 2003.

26. Cichy M., *Modelowanie systemów energetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, ISBN 83-88007-67-X, Gdańsk 2001.
27. Cioska A., *Analiza pola magnetycznego w szczelinie powietrznej niesymetrycznych maszyn indukcyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7335-539-2, Gliwice 2008.
28. Cioska A., *Rozkłady przestrzenne wartości maksymalnych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej maszyn prądu przemiennego*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 83, nr 3, 2007, s. 15–18.
29. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza parametrów elektromechanicznych rozrusznika samochodowego z silnikiem bezszczotkowym*, „Politechnika Wrocławska, Studia i Materiały”, nr 27, 2007, s. 1–10.
30. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza polowo-obwodowa rozrusznika samochodowego o magnesach trwałych*, „Politechnika Wrocławska. Studia i Materiały”, nr 30, 2010, s. 70–81.
31. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza wpływu parametrów akumulatora na pracę rozrusznika samochodowego z silnikiem BLDC*, „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów I Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej”, ISSN 1733-0718, nr 31, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 3–16.
32. Ciurys M., Dudzikowski I., *Model matematyczny rozrusznika samochodowego z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów I Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej”, ISSN 1733-0718, nr 26, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006, s. 120–133.
33. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza parametrów rozrusznika samochodowego z silnikiem BLDC*, „Zeszyty problemowe, Maszyny elektryczne”, nr 88, 2010, s. 19–24.
34. Ciurys M., Dudzikowski I., *Rozrusznik samochodowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, „Elektrotechnika i elektronika”, t. 24, z. 2, 2006, s. 129–132.
35. Cvetkovski C., *Performance evaluation of PM DC commutator motor using Finite Element Method as a toll*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 83, nr 7, 2007, s. 152–155.
36. Czaban A., Lis M., *A mathematical model of a DC drive on the basis of variational approaches*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 88, nr 12b, 2012, s. 20–22.
37. Czajewski J., *Podstawy metrologii elektrycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 83-7207-376-7, Warszawa 2003.
38. Czarnigowski J., Drożdżel P., Kordos P., *Characteristics rotational Speed ranges of a crankshaft Turing combustion engine operations car maintenance*, „Eksplotacja I Niezawodność”, nr 2, 2002, s. 55–62.

39. Czech P., *Wspomaganie systemu OBD sztucznymi sieciami neuronowymi wykorzystującymi sygnały wibroakustyczne jako metoda diagnozowania uszkodzeń silników spalinowych w pojazdach*, Instytut Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu, ISBN 978-83-7789-263-3, Radom 2014.
40. Dąbała K., *Hybrydowa metoda wyznaczania sprawności silników indukcyjnych*, „Prace Instytutu Elektrotechniki”, ISSN 0032-6216, z. 271, Warszawa 2015.
41. Dąbrowski M., *Aktualne zagadnienia analizy promieniowego naciągu magnetycznego w maszynach elektrycznych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 3, 2002, s. 73–79.
42. Dąbrowski M., Kowalczyk S., Trawiński G., *Diagnostyka pojazdów samochodowych*, WSiP, Warszawa 2013.
43. Dąbrowski M., *Zarys rozwoju badań nad naciągami magnetycznymi w maszynach elektrycznych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 88, nr 8, 2012, s. 271–282.
44. Dąbrowski T., *Badanie i wnioskowanie diagnostyczne. Wybrane zagadnienia*, WAT, Warszawa 2013.
45. Denton T., *Automobile electric al and electronic systems – third edition*, Elsevier Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-62190, 2004.
46. Drabarek J., *Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce urządzeń elektrycznych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011.
47. Drak B., Glinka T., Kapinos J., Miksiewicz R., Zientek P., *Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce*, Instytut Napędów I Maszyn Elektrycznych KOMEL, ISBN 978-83-931909-4-2, Katowice 2013.
48. Drozd K., Dziubiński M., Goral D., *Wykorzystanie techniki komputerowej do diagnostyki rozruszników*, „Mechanika. 14 Międzynarodowe Sympozjum Naukowe MPM”, 6–9 kwietnia 1992, Zielona Góra, s. 72–76.
49. Drożdziel P., *Wybrane zagadnienia rozruchu samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym*, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, ISBN 83-911-726-2-7, Warszawa 2007.
50. Drożdziel P., *Widmo rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania samochodu*, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacji, Warszawa 2009.
51. Dudzikowski I., Ciurys M., *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, „Postępy napędu elektrycznego i energoelektryki”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN 978-83-7493-653-8, t. 20, Wrocław 2011.
52. Dudzikowski I., Gierak D., Paweletz A., *Transient Analysis of Premanent Magnet Commutator Motor*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 82, nr 11, 2006, s. 64–67.

53. Dudzikowski I., *Silniki komutatorowe wzbudzone magnesami trwałymi*, „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały”, nr 25, 2005.
54. Dwojak J., Szymaniec S., *Diagnostyka eksploatacyjna zespołów maszynowych w energetyce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, ISBN 978-83-64056-12-3, Opole 2013.
55. Dybała J., Radkowski S., *Wykorzystanie wieloźródłowej informacji w pro aktywnej strategii eksploatacji*, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, Instytut Technologii Eksploatacji-PIB, ISBN 978-83-7789-035-6, Warszawa-Radom 2012.
56. Dyga G., Trawiński G., *Diagnostyka układów elektrycznych i elektronicznych pojazdów samochodowych*, WSiP, Warszawa 2014.
57. Dzida J., Dzida J., *The anlysis of a possibility of construction of a start – stop system based on an elastic type mechanical starter – accumulator*, „Combustion Engines”, no. 3, 2009, s. 14–22.
58. Dzieniszewski G., Sz wajka K., *Diagnostyka pojazdów i maszyn wspomagana komputerowo*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, ISBN 978-83-7338-289-3, Rzeszów 2007.
59. Dziubiński M., Walusiak S., *Analiza komputerowa stanu technicznego wybranych elementów rozrusznika*, „Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN o. Kraków”, z. 11, 1997, s. 177–182.
60. Dziubiński M., *Aspekty niezawodności w produkcji rozrusznika samochodu, reliability in manufacturing of starter*, New ways in manufacturing technologies 2004, 7 th International Scientific Conference, Prešov, 17– 18.6.2004, Proceedings, Košice, Technická Univerzita v Košiciach, 2004.
61. Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., *Simulation tests of the starting system*, „Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering”, Poznań Univeristy of Technology, ISSN 1897-0737, nr 88, Poznań 2016, s. 89–100.
62. Dziubiński M., Kowal J., Pęcak M., *Badania diagnostyczne rozrusznika samochodowego z wykorzystaniem zjawiska Halla*, „Badania symulacyjne w technice samochodowej”, Komisja Naukowo- Problemowa Motoryzacji, Lublin 1995, s. 73–78.
63. Dziubiński M., Krasowski E., Plizga K., *Wybrane zagadnienia rezerwowania i nadmiarowości elementów w technice motoryzacyjnej*, „International scientific and practical conference AGROMECH 2004”, nr 8, Lwów 2004, s. 450–458.
64. Dziubiński M., Krasowski E., Plizga K., *Analiza nadmiarowości w rozrusznikach samochodowych*, „32 Zimowa Szkoła Niezawodności. Nadmiarowość w Inżynierii Niezawodności”, Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Szczyrk 2004, s. 81–88.

65. Dziubiński M., Krasowski E., Plizga K., *Koncepcja wykorzystania zjawiska Halla do prognozowania niezawodności obwodu rozruchu*, „Międzynarodowa Konferencja Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa MOTROL 2003”, Kijów 2003, s. 41–48.
66. Dziubiński M., Krasowski E., Plizga K., *Metody rozpoznawania uszkodzeń rozruszników samochodowych*, „33 Zimowa Szkoła Niezawodności. Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń”, Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Szczyrk 2005, s. 106–117.
67. Dziubiński M., Ocioszyński J., Walusiak S., *Elektrotechnika i elektronika samochodowa*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1999.
68. Dziubiński M., Plich M., Drozd A., *Modelling and simulation characteristics of starting system*, „Journal of KONBIN-Safety and Reliability System”, ISSN 1895-8281, nr 1 (37), 2016, s. 277–386.
69. Dziubiński M., *Reliability and maintenance of starters*, „Problemi Tehniki. Naukowo Wirobniczj Żurnal”, Odeski Nacionalnyj Morskji Universitet, nr 2, Odessa 2004, s. 202–209.
70. Dziubiński M., *Reliability aspects in constructing vehicle electronic equipment*, „Journal of Middle European Construction and Design of Cars MECCA”, ISSN 1214-0821, vol. 1, no. 4, Praga 2003, s. 44–48.
71. Dziubiński M., *Reliability aspects in manufacturing of starter*, „7th International Scientific Conference. New ways in manufacturing technologies”, ISBN 80-8073-136-5, Presov 2004, s. 385–390.
72. Dziubiński M., *Reliability of combustion engine electric equipment*, „Transport and Telecommunication”, ISBN 9984-668-98-3, ISSN 1407-6160, vol. 7, no. 2, Ryga 2006, s. 318–326.
73. Dziubiński M., *Systemy badawcze układu rozruchowego w środkach transportu*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2016.
74. Ebrahimi E., Mollazade K., *Intelligent fault classification of a tractor starter motor using vibration monitoring and adaptive neuro – fuzzy inference system*, „Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring”, vol. 52, no. 10, October 2010, s. 561–566.
75. 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.
76. Fei W., Xia B., Luk P., *Permanent – magnet flux – switching integrated starter generator with different rotor configurations for cogging torque and torque ripple mitigations*, „IEEE Transactions on Industry Applications”, 2011, s. 1715–1722.
77. Filizadeh S., *Electric Machines and Drives-Principles, Control, Modeling and Simulation*, CRC Press, ISBN 978-1-4398-5807-3, 2013.

78. Forgez Ch., Loron E., Plasse S., *Temperature supervision of an integrated starter generator*, „Industry Applications Conference”, 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, vol. 3, 8–12 Oct. 2006, s. 1613–1619.
79. Frisk E., Krysander M., Nyberg M., Aslund J., *A toolbox for design of diagnosis systems*, 6th IFAC Symposium on Fault Detection, „Supervision and Safety of Technical Processes”, International Federation of Automatic Control, 2006.
80. Frydrychowicz-Jastrzębska G., *Jednostronny naciąg magnetyczny w silnikach indukcyjnych jednofazowych dwubiegunowych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 12, 2003, s. 945–947.
81. Fu Z., Gao A., Wang. X., Song X., *Torque Split Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles with an Integrated Starter Generator*, „Discrete Dynamics in Nature and Society”, 2014, s. 1–10.
82. Fuessel D, Isermann R., *Hierarchical motor diagnosis utilizing structural knowledge and a self – learning neuro – fuzzy scheme*, „IEEE Transactions on Industrial Electronics”, vol. 3, 2000, s. 1893–1898.
83. Fuessel D., Isermann R., *Hierarchical motor diagnosis utilizing structural knowledge and a self-learning neuro-fuzzy scheme*, „IEEE Transactions on Industrial Electronics”, vol. 47, no. 5, October 2000, s. 1070–1077.
84. Füvesi V., E. Kovács, *Diagnoses of additive faults of serial wounded motor using artificial intelligence methods*, „Recent Innovations in Mechatronics”, vol. 1, no. 1–2, 2014.
85. Füvesi V., Kovács E., *Modelling of a starter motor with feedforward neural network*, „Proceedings of 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics”, ISBN 978-80-553-0734-3, September 2011, s. 205–209.
86. Fuvesi V., Kovacs E., Blaga C., *Measurement and identification of a starter motor system*, „Proceedings of the 2nd international conference on recent achievements in mechatronics, automation, computer science and robotics, Macro 2010”, Cientiascientia Publishing House, Cluj-Napoca 2010, s. 129–134.
87. Fuvesi V., Kovacs E., *Modeling loaded starter motor with neural network*, „International Symposium on Computational Intelligence and Informatics”, 21–22 Nov. 2011, s. 551–554.
88. Gad S., Słoń G., *Wspomagana komputerowo metoda doboru obwodu rozruchowego*, „6 Konferencja Naukowo-Techniczna Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice”, Poznań, 23–25 kwiecień 2001, s. 607–610.
89. Gad S., Jestriebow A., Laskowski M., Słoń G., Zawadzki A., *Symptomowe modele diagnozowania samochodowych urządzeń elektrycznych*, „Materiały V Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów”, Ustroń 2003, s. 323–324.

90. Gad S., Pawlak M., *Sztuczne sieci neuronowe w diagnostyce samochodowych urządzeń elektrycznych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 7–8, 2004, s. 693–697.
91. Gałkin S., Gnat K., Hryniewicz J., Nienartowicz B., *Badania symulacyjne układów mechatronicznych – część I. Badania maszyn elektrycznych w stanach statycznych*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej, ISBN 978-83-89901-51-4, Szczecin 2011.
92. Gębura A., Dadoń T., *Output voltage pulsation as source of diagnostic information about commutator – type DC generators*, „Research Works Of Afif”, Issue 33, 2013, s. 75–93.
93. Glinka T., Jakubiec M., *Silniki elektryczne z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku*, „Zeszyty problemowe. Maszyny elektryczne”, nr 71, 2005, s. 103–112.
94. Glinka T., Kulesz B., *Laboratorium elektromechanicznych elementów wykonawczych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 83-7335-246-5, Gliwice 2004.
95. Glinka T., Kulesz B., Setlak R., *Laboratorium elektrotechniki i elektroniki samochodowej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 83-7335-291-0, Gliwice 2004.
96. Glinka T., *Maszyny elektryczne i transformatory – Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, ISBN 978-83-931909-1, 2015.
97. Głowacz A., Głowacz W., *Diagnostyka maszyny prądu stałego oparta na rozpoznawaniu dźwięków z zastosowaniem LPC i logiki rozmytej*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 85, nr 6, 2009, s. 112–115.
98. Głowacz Z., Zdrojewski A., *Analiza spektralna sygnałów z silnika komutatorowego prądu stałego zasilanego ze źródła napięcia stałego*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 82, nr 11, 2006, s. 76–79.
99. Głowacz Z., Zdrojewski A., *Diagnostics of commutator DC motor using spectral analysis method*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 85, nr 1, 2009, s. 147–150.
100. Gołębiowski L., Gołębiowski M., Mazur D., Trojnar M., *Modelling of Induction Motors with AirGap Eccentricity by FEM*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 12, 2003, s. 880–887.
101. Goleman R., *Szybkoobrotowe hybrydowe silniki indukcyjne zasilane bezpośrednio z sieci 50 Hz*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, ISBN 978-83-63569-79-2, Lublin 2013.
102. Gonen T., *Electrical Machines with Matlab-second edition*, ISBN 978-1-4398-7799-9, CRC Press, 2012.
103. Gu H., Zhao J., Zhang X., *Hybrid methodology of degradation feature extraction for bearing prognostics*, „Eksploatacja I Niezawodność”, vol. 15, no. 2, 2013, s. 195–201.

104. Hajek V., Vitek O., Kuchynkova H., *New type of axial starter*, „Zeszyty problemowe. Maszyny elektryczne”, nr 87, 2010, s. 59–62.
105. Hajek V., Vitek O., Kuchynkova H., *Starter unique conception*, „Zeszyty problemowe. Maszyny elektryczne”, nr 86, 2010, s. 159–162.
106. Hebda M., *Eksploracja samochodów*, Instytut Technologii I Eksploatacji-PiB, Radom 2005.
107. Hiuhe W., Yan. L., Yanliang X., *The study of permanent magnet motor with auxiliary poles*, „Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems”, IEEE, 18–20 Aug. 2001, 838–831.
108. Honbo R., Wakabayashi H., Murakami Y., Inayoshi N., Shimaoyama T., Morita N., *Lead – free brush materials for starter motors*, vol. 14, 2009, s. 97–107.
109. Honbo R., Wakabayashi H., Sawa K., Shimaoyama T., Morita N., *Development of the lead – free brush material for the high load starter*, „IEEE Trans. Electron.”, nr 8, 2007, s.1634–1642.
110. Hrubec J., Borkowski S., *Efficiency of exploitation machine and capability of process quality*, Instytut Organizacji I Zarządzania w Przemysle ORGMASZ, ISBN 93-86929-99-5, Warszawa 2006.
111. Hu J., Li G., *CAN – based passenger car starter information integrated control method and its implementation*, „IEEE International Symposium On Industrial Electronics”, 2009, s. 1203–1208.
112. Issermann R., *Model – based fault – detection and diagnosis – status and applications*, „Annual Reviews in Control”, vol. 29, Issue 1, 2005, s.71–75.
113. J. Posta, Pavlicek R., Hladik T., *Sample rate selection for oscilloscopic diagnostics of alternator and starter*, „RES.AGR.ENG”, vol. 48, 2002, s. 73–77.
114. Jakubczak H., *Niepewność danych w prognozowaniu trwałości zmęczeniowej konstrukcji nośnych maszyn*, „Prace Naukowe Mechanika”, z. 194, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
115. Jarzyna W., *Diagnostyka układu napędowego w czasie rzeczywistym*, „Postępy napędu elektrycznego i energoelektroniki”, z. 50, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, ISSN 0079-4260, Lublin 2003.
116. Jaszczuk W., *Elektromagnesy prądu stałego dla praktyków*, Wydawnictwo BTC, ISBN 978-83-60233-97-9, Legionowo 2014.
117. Jestriebow A., Gad S., Słoń G., Laskowski M., *Modele sztucznej inteligencji w komputerowej diagnostyce wyposażenia elektrycznego samochodu*, „10 Konferencja Naukowo-Techniczna Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice”, Poznań, 18–20 kwiecień 2005, s. 39–40.
118. Jestriebow A., Gad S., Słoń G., *Analiza dynamiki rozmytych map kognitywnych w diagnostycznym monitorowaniu systemów*, „XIX Scientific Conference Computer Applications in Electrical Engineering”, Poznań 2009, s. 287–288.

119. Jestriebow A., Gad S., Słoń G., Laskowski M., *Rozmyto-neuronowe modele diagnozowania układów technicznych*, „Materiały 6 Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej”, Diagnostyka Procesów Przemysłowych DPP Władysławo 2003, s. 275–281.
120. Jurca F., Martins C., *Design of a permanent magnet synchronus machine for integrated starter-alternator*, „Conference. Electric Machines & Drives Conference”, Univeritatea Tehnica din Iasi. Electrotehnica, energetica, electronica, 2011.
121. Jurkovic S., Strangas E., *Comprasion of PMAC Machines for Starter-Generator Application in a Series Hybrid-Electric Bus*, „International Journal of Vehicular Technology”, 2011, s.1–11.
122. K. Sawa, *The basis of commutation arc phenomena and brush commutator wear*, Industry and Science Systems, 2003.
123. Kałdoński T., Koliński K., Pszczółkowski J., *Sterowanie procesem zapłonu paliw w warunkach rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*, „Journal of KONES Internal Combustion Engines”, vol. 10, no. 1–2, 2003, s. 83–90.
124. Kamiński G., *Silniki elektryczne z toczącymi się wirnikami*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 83-7207-403-8, Warszawa, 2003.
125. Kim S., *Thermal Performance of Motor and Inverter in a Integrated Starter Generator System for a Hybrid Electric Vehicle*, „Energies”, 2013, vol. 6(11), s. 6102–6119.
126. Kiyoumars A., *Analysis and comparison of a permanent magnet DC motor with a wield-winding DC motor*, „Journal of Electrical Engineering”, vol. 4, 2009, s. 370–376.
127. Koliński K., Pszczółkowski J., *Stanowisko do badań właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym*, „Rozruch silników spalinowych”, Szczecin 2000.
128. Kolman R., *Zdobywanie wiedzy, Poradnik podnoszenia kwalifikacji (magisteria, doktoraty, habilitacje)*, Oficyna Wydawnicza Branta, Gdańsk 2004.
129. Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewy W., *Diagnostyka procesów. Modele, Metody Sztucznej Inteligencji, Zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, ISBN 83-204-2734-7, Warszawa, 2002.
130. Korbicz J., Kościelny J., *Modelowanie, diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami. Implementacja w systemie DiaSter*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, ISBN 978-83-204-3612-9, Warszawa 2009.
131. Korbicz J., *Measurements, models, systems and design*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności-WKŁ, ISBN 978-83-206-1644-6, Warszawa 2007.
132. Kovacs E., Blaga C., *Performance curve of an alternator based on mathematical model*, „MACRo'2010-International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics”, s. 189–195.

133. Krupa K., *Modelowanie, symulacja i prognozowanie – systemy ciągłe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, ISBN 978-83-204-3426-2, Warszawa 2008.
134. Kuranc A., *Ekologiczny aspekt zimnego i gorącego rozruchu silnika spalinowego o zapłonie iskrowym*, „Eksploracja i Niezawodność”, nr 2, 2008, s. 40–44.
135. Labbe N., *An innovative current – limiting device for automotive micro – hybrid starter motors*, „2012 XXth International Conference on Electrical Machines”, IEEE, 2012, s. 1935–1940.
136. Labbe N., Andreux R., Yonnet J., Vauquelin A., Vilain J., *Innovative permanent – magnet starter motors for automotive micro – hybrid applications*, IEEE, 2014, 2436–2441.
137. Labbe N., *Starter circuit for road vehicle comprising a battery voltage uprasing device, and starter equipped*, FR Patent 10/60300, 2010.
138. Laber S., *Wybrane problemy eksploatacji maszyn*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii i Eksploatacji-PIB, ISBN 978-83-7789-028-8, Zielona Góra 2011.
139. Lee Ch., Kim J., Hong J., *Core loss effects on electrical steel sheet of wound rotor synchronus motor for integrated starter generator*, „Journal of Magnetism”, vol. 20, no. 2, 30 Jun 2015, s. 148–154.
140. Legutko S., *Eksploatacja maszyn 1*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7143-255-2, 2007.
141. Lindstedt P., *Diagnostyka w systemie eksploatacji obiektów technicznych*, „Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn”, z. 13, 2006, s. 98–110.
142. Lotko A., *Technologie informatyczne w motoryzacji*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, ISBN 83-88001-83-3, Radom 2001.
143. Ma H., Tai X., Zhang Z., Wen B., *Dynamic Characteristic Analysis of a Rotor System with Rub – impact Fault Considering Rotor – stator Misalignment*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 88, nr 9b, 2012, s. 145–149.
144. Ma Q., Rajagopalan S., Yurkovich S., Guezennec Y., *A high fidelity starter model for engine start simulations*, „2005 American Control Conference. June 8 – 10, 2005”, Portland 2005, s. 4423–4427.
145. Martin G., *An Integrated Starter – Alternator System using Induction Machine Winding Reconfiguration*, „IEEE Future Energy Challenge”, 2007.
146. Merksiz J., Rymaniak Ł., Ziółkowski A., *The anallysis of the emission from SUV vehicle fitted with CI engine and start – stop system*, „Journal of KONBIN”, vol. 22, no. 2, 2012, s. 171–180.
147. Mirahki H., Moallem M., Rahimi S., *Design optimalization of IPMSM for 42 Vintegrated starter altenator using lumped pameter model and genetic algorithms*, „IEEE Transactions on Magnetism”, vol. 50, Issue 3, 2014.

148. Mitaniec W., *Eksplatacja i bezpieczeństwo pojazdów*, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, ISBN 978-83-7242-790-8, Kraków 2014.
149. Morzuch W., *Dynamic stability of rotor or electric motor loaded by axial compression and magnetic tension*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033 – 2097, r. 86, nr 7, 2010, s. 357–359.
150. Murugesan V., Chandramohan G., Senthil M., Rudramoorthy R., Ashok L., Suresh R., Basha D., Vishnu K., *An overview of automobile starting system faults and fault diagnosis methods*, „ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences”, vol. 7, no. 7, July 2012, s. 812–819.
151. Murugesan V., Chandramohan G., Senthil M., Rudramoorthy R., Ashok L., Suresh R., Basha D., Vishnu K., *Development of ECU based starting system for automobiles*, „2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing (PACC)”, 20–22 July 2011, s. 1–5.
152. Murugesan V., Chandramohan G., Senthil M., Rudramoorthy R., Ashok L., Suresh R., Basha D., Vishnu K., *A novel approach to develop ECU based automobile starting system using LabView for safe and reliable start*, „ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences”, ISSN 1819-6608, vol. 7, no. 7, 2012, s. 867–879.
153. Murugesan V., Chandramohan G., Senthil M., Rudramoorthy R., Ashok L., Palla R., *Analysis of automobile starter solenoid switch for improved life*, „Automatika”, ISSN 0005-1144, vol. 55, 2014, s. 256–264.
154. Mysłowski J., *Doładowanie silników*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, ISBN 978-83-206-1964-5, Warszawa 2016.
155. Mysłowski J., *Eksplatacja silników spalinowych*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2000.
156. Mysłowski J., *Rozruch silników spalinowych – materiały sympozjum*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, ISBN 83-87423-39-4, Szczecin 2000.
157. Mysłowski J., *Tendencje rozwojowe silników spalinowych o zapłonie samoczynnym*, Wydawnictwo Autobusy, ISBN 978-83-920826-8-2, Radom 2006.
158. Nadolski R., Staszak J., Ludwinek K., Gawęcki Z., *Straty mocy w układzie napędowym bezszczotkowego silnika prądu stałego o magnesach trwałych*, „10 Sympozjum Podstawowe Problemy Energetyki i Elektromechaniki” Wisła, 7–10 grudnia 2003, s. 17–22.
159. Nagy L., Szabo T., Jakub E., *Electro – dynamical modeling of a solenoid switch of starter motors*, „Procedia Engineering”, vol. 48, 2012, s. 445–452.
160. Niziński S., *Eksplatacja obiektów technicznych*, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji, ISBN 83-7204-284-5, Warszawa 2002.
161. Nizniński S., Michalski R., *Diagnostyka obiektów technicznych*, Wydaw. i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji, Warszawa 2002.

162. Nowakowski J., *Model cyklu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym i jego zastosowanie do doboru parametrów eksploatacyjnych*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, ISSN 1643-983-X, Bielsko-Biała, 2005.
163. Nyberg M., Frisk E., *A derivation of the minimal polynomial basis approach to linear residual generation*, „Journal of Automatica”, vol. 37, Issue 9, September 2001, s. 1417–1424.
164. Opalski L., *Metody i algorytmy optymalizacji jakości układów elektronicznych*, „Prace naukowe Politechniki Warszawskiej Elektronika”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, z. 135, Warszawa 2002.
165. Oszałdowski M., Berus T., Zimniak M., *Czujniki Halla z silnie domieszkowanych epitaksjalnych warstw n – InSb*, „Przegląd Elektrotechniczny”, ISSN 0033-2097, r. 80, nr 2, 2004, s. 88–92.
166. Owens P., *Take a step – by – step approach to analyze motor starting problems*, „Plant Engineering”, 2005, s.65–70.
167. Pacholski K., *Elektryczne i elektroniczne wyposażenie pojazdów samochodowych. Część 1. Wyposażenie elektryczne i elektromechaniczne*, WKŁ, Warszawa 2014.
168. Partyka J., Wójtowicz A., Zaprawa P., Wolski L., *System rozruchu silników spalinowych z wykorzystaniem superkondensatorów*, „Prace Instytutu Elektrotechniki”, z. 262, 2013, s.81–91.
169. Pasko J., *Ocena niezawodności podsystemu wytwórczego systemu elektroenergetycznego*, „Politechnika Warszawska. Prace Naukowe. Elektryka”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISSN 0137-2319, z. 120, Warszawa 2002.
170. Patton R., Chen J., *Design methods for robust fault diagnosis*, „Control system, Robotics and Automation”, vol. 26, 2005.
171. Patton R., Uppal F., Lopez-Toribio J., *Soft Computing Approaches To Fault Diagnosis For Dynamic Systems: A Survey*, „Proc. of 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes”, Budapest, 14–16 June 2000, vol. 1, s. 298–311.
172. Piłat A., *Systemy aktywnej lewitacji magnetycznej*, „Rozprawy, monografie 288”, Wydawnictwa AGH, ISBN 978-83-7464-621-5, Kraków 2013.
173. Plich M., Dziubiński M., Stypułkowski K., *Influence of changes in electrical and electronic equipment on the increase of reliability in vehicles*, „Journal of KONBIN-Safety and Reliability System”, ISSN 1895-8281, nr 1 (37), 2016, s. 297–307.
174. Plizga K., *An evaluation of the technical state of a starter using the hall effect – part 2*, „Teka Kom. Mat. Energ. Rol. OL PAN”, nr 9, 2009, s. 244–250.
175. Posta J., Pavlicek R., *Sample rate selection for oscilloscopic diagnostics of alternator and starter*, „Res. Agr. Eng.”, vol. 48, 2002, s. 73–77.
176. Przepiórkowski J., *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*, Wydawnictwo BTC, ISBN 978-83-60233-15-3, Warszawa 2007.

177. Przyborowski W., Kupiec E., *Model i podstawowe równania rozrusznika alternatora o wzbudzeniu hybrydowym z kolektorową strukturą magnesów*, „Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne”, nr 4, 2014, s. 55–60.
178. Przyborowski W., Kamiński G., *Maszyny elektryczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-037-5, Warszawa 2014.
179. Pszczółkowski J., Trawiński G., *Napędzanie wału korbowego silnika rozrusznikiem elektrycznym i pneumatycznym*, „Logistyka”, nr 6, 2011, s. 3499–3508.
180. Pszczółkowski J., *Wartość konieczna rozruchowej prędkości obrotowej silnika o zapłonie samoczynnym*, „Journal of KONES Internal Combustion Engines”, vol. 11, no. 3–4, 2004, s. 152–170.
181. Pszczółkowski J., *Analityczny opis charakterystyk rozrusznika elektrycznego*, „26 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silników Spalinowych Kones”, Nałęczów 2000, s. 262–271.
182. Pszczółkowski J., *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*, Wojskowa Akademia Techniczna WAT, ISBN 978-83-61586-08-4, Warszawa 2009.
183. Radwański W., Madej J., *Naciąg magnetyczny w maszynach elektrycznych wirujących z magnesami trwałymi*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Seria Mechanika”, z. 103, 2014, s. 157–158.
184. Reif K., *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*, 2011.
185. Rosiński A., *Modelowanie procesu eksploatacji systemów telematyki transportu*, „Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej”, ISBN 978-83-7814-450-2, Warszawa 2015.
186. Saidani S., Ghariani M., *Switched Reluctance Machine For A Starter – Alternator Micro – Hybrid Car*, „Intelligent Control and Automation”, vol. 6, 2015, s. 271–288.
187. Sawa K., *Development of the lead – free brush material for the high – load starter*, „IEICE Trans. Electron”, no. 8, August 2007, s. 1634–1642.
188. Sawa K., *Development of the lead – free carbon brush material for starters*, „IEICE Trans. Electron.”, no. 8, August 2005, s. 1675–1681.
189. Schafer H., *Optimization of the Power Train in Vehicles by Using the Integrated Starter Generator*, Expert Verlag, 2002.
190. Schupbach R., Błada J., *New energy – storage unit for heavy – duty vehicles encompassing cold – weather starting*, „35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference”, s. 2786–2791.
191. Sęk A., Ludowski P., *Rozruszniki samochodowe z magnesami trwałymi i przekładnią planetarną – analiza i ocena konstrukcji*, „Politechnika Warszawska. Sympozjum Naukowe Współczesne urządzenia elektromechaniki pojazdów samochodowych”, Warszawa 2004, s. 46–51.
192. Sęk A., Polakowski K., *Analiza pola magnetycznego w rozruszniku samochodowym z magnesami trwałymi i przekładnią planetarną*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 7–8, 2004, s. 702–705.

193. Siczek K., *Wpływ temperatury na pracę łożysk rozrusznika*, „Archiwum motoryzacji”, vol. 7, nr 3, 2004, s. 211–225.
194. Siergiejczyk M., *Efektywność eksploatacyjna systemów telematyki transportu*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, z. 67, Warszawa 2009.
195. Simani S., Fantuzzi C., Patton R., *Model based fault diagnosis in dynamics system using identification techniques*, Springer-Verlag, Spring 2002.
196. Sitek K., Syta S., *Pojazdy samochodowe. Badania stanowiskowe i diagnostyka*, WKiŁ, Warszawa 2011.
197. Skocia A., *Zagadnienia trwałości w projektowaniu badaniach i eksploatacji elementów maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 83-7335-190-6, Gliwice 2003.
198. Sławik D., *Metody badania wrażliwości cech sygnałów diagnostycznych*, Wydawca-Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, ISBN 83-916957-8-6, Gliwice 2005.
199. Sowa A., *Ocena stanu technicznego pojazdów szynowych na podstawie cech zdeterminowanych*, „Seria Mechanika. Monografia 430”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISSN 0860-097X, Kraków 2013.
200. Strach M., *Nowoczesne techniki pomiarowe w procesie modernizacji i diagnostyce geometrii torów kolejowych*, „Rozprawy, monografie 285”, Wydawnictwa AGH, ISBN 978-83-7464-618-5, Kraków 2013.
201. Styła S., *Diagnostyka rozrusznika samochodowego w warunkach laboratoryjnych*, „MOTROL-Commission of motorization and energetics in agriculture”, vol. 14, no. 5, 2012, s. 129–133.
202. Sumorek A., *Problemy usuwania uszkodzeń urządzeń elektroniki pojazdowej – wybrany przypadek*, „Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture”, vol. 14, nr 5, 2012, s. 135–141.
203. Svärd C., Nyberg M., *Residual Generators for Fault Diagnosis Using Computation Sequences With Mixed Causality Applied to Automotive Systems*, „IEEE Transactions on systems man and cybernetics. Part A Systems and Humans”, vol. 40, no. 6, 2010, s. 1310–1328.
204. Świsulski D., *Komputerowa technika pomiarowa – oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabView*, Agenda Wydawnicza PAK – u, ISBN 83-87982-56-3, Warszawa 2005.
205. Świsulski D., *Systemy pomiarowe laboratorium*, Gdańsk 2001.
206. Szadziul R., *Studium eksploatacji pojazdów*, „Monografia Wydziału Mechanicznego”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, ISSN 0239-7129, Koszalin 2006.
207. Szalontai L., Kovacs E., Blaga C., *Investigation of the Solenoid Switch of a Electric Starter Motor Using FEM Model*, MACRO 2010.
208. Taleb M., *Matlab/Simulink Models For Typical Soft Starting Means For A DC Motor*, „International Journal of Electronics&Computer Sciences”, 2011.

209. Toliyat H., Nandi S., Choi S., Meshgin-Klek H., *Electric, condition monitoring and fault diagnosis*, CRC Press, ISBN 978-0-8493-7027-4, 2013.
210. Tomaszek H., Żurek J., Jasztal M., *Prognozowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Technologii Eksploatacji-PIB, ISBN 978-83-7204-696-3, Warszawa 2008.
211. Trzeciak K., *Diagnostyka samochodów osobowych*, WKiŁ, Warszawa 2013.
212. Tutaj J., *New concept of the automotive onboard – generators/starter – motor system*, „Journal of Kones Internal Combustion Engines”, vol. 12, no. 3–4, 2005, s. 335–342.
213. Tutaj J., *Ujęcie systemowe dynamiki wielofunkcyjnego prądnico rozrusznika silnika spalinowego pojazdu samochodowego*, „Seria Mechanika. Monografia 409”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISSN 0860-097X, Kraków 2012.
214. Tutaj J., *A mathematical model of the generator starter for automotive vehicles*, „Journal of Kones Powertrain and Transport”, vol. 16, nr 1, 2009.
215. Tylicki H., Żółtowski B., *Rozpoznawanie stanu maszyn*, „Instytut Technologii Eksploatacji-PIB”, ISBN 978-83-7204-917-9, Radom 2010.
216. Tylicki H., Żółtowski B., *Urządzenia elektryczne pojazdów samochodowych*, „Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Staszica w Pile”, ISBN 978-83-897-95-94-6, Piła 2011.
217. Uecker A., *Lead – free carbon brushes for automotive starters*, „Elsevier Science, Wear”, vol. 255, no. 7, August 2003, s. 1286–1290.
218. Uppal F., Patton R., Palade V., *Neurofuzzy based fault diagnosis applied to an electro – pneumatic valve*, 15th IFAC World Congress on Automatic Control, Barcelona 2002.
219. 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)”, ISSN 1869-1951, no. 14, 2013, s. 941–952.
220. Veltman A., Pulle D., Doncker R., *Fundamentals of electrical drives*, Springer, ISBN 978-1-4020-5503-4, 2007.
221. Viorel I., Szabo L., Lowenstein L., Stet C., *Integrated starter generators for automotive applications*, „ACTA Electrotehnica”, vol. 45, nr 3, 2004, s. 255–260.
222. Walusiak S., Pietrzyk W., Dziubiński M., *Analiza uszkodzeń wybranych układów wyposażenia elektrycznego samochodu*, 6 Konferencja Naukowo-Techniczna Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, Poznań, 19–21 kwiecień 2004.

223. Walusiak S., Dziubiński M., *Analiza uszkodzeń wyposażenia elektrycznego pojazdów samochodowych*. „Teka Komisji Naukowo-Problekowej Motoryzacji. Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych”, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, ISBN 83-906476-5-6, z. 11, Kraków 1997, s. 215–220.
224. Walusiak S., Dziubiński M., Pietrzyk W., Sumorek A., *Badania niezawodności elementów wyposażenia elektrycznego samochodów*, „Teka Komisji Naukowo-Problekowej Motoryzacji. Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych”, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, ISSN 1642-1639, z. 26–27, Kraków 2003, s. 499–506.
225. Walusiak S., Dziubiński M., *Analiza uszkodzeń wyposażenia elektrycznego pojazdów samochodowych*, „Teka Komisji Naukowo-Problekowej Motoryzacji”, PAN Kraków, z. 11, 1997, s. 37–41.
226. 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.
227. Wang. X., Hahn S., Jung. H., *Performance analysis and optialization of a permanent – magnet starter motor with auxiliary poles by FEM*, „IEEE Transactions on Magnetisc”, 2003, s. 1476–1479.
228. Wasilczuk M., *Projektowanie hydrodynamicznych łożysk wzdłużnych z wykorzystaniem optymalizacji kształtu szczeliny smarowej*, „Zagadnienia Eksploatacji Maszyn”, z. 1 (145), 2006, s. 23–36.
229. Wendeker M., *Badania algorytmów sterujących samochodowym silnikiem benzynowym*, Wydawnictwo Naukowe PWN, ISBN 83-01-12989-1, Warszawa 2000.
230. Wojtusik J., *Wielomodele diagnostyczne maszyn wirnikowych*, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, ISBN 83-916957-2-7, Gliwice 2006.
231. Yakovlev V., Sinitsin A., *Analysis of the operations of charging units of supercapacitor starters of automobile motors*, „Russian Electrical Engineering”, ISSN 1068-3712, vol. 79, no. 8, 2008, s. 419–422.
232. Zaidi S., Aviyente S., Salman M., Shin K., *Prognosis of gear failures in DC starter motors using hidden Markov Models*, „IEEE Transactions of Industrial Electronics”, 2011, s. 1695–1706.
233. Żak J., *Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz*, „Prace Naukowe. Transport z. 99”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISSN 1230-9265, ISBN 978-83-7814-154-9, Warszawa 2013.
234. Zeng S., Sun B., Tong Ch., *Zmodyfikowany model prognozowania niezawodności urządzeń elektronicznych*, „Eksploatacja i Niezawodność”, nr 4, 2009, s. 4–9.
235. Zięba J., *Simulation of a solenoid actuator for a device for investigating dynamic air permeability through Flat textile products*, „Fibres&Textiles in Estern Europe”, vol. 11, no. 2 (41), 2003, s. 85–87.

- 236. Żółtowski B., *Metody inżynierii wirtualnej w badaniach stanu, zagrożeń bezpieczeństwa i środowiska eksploatowanych maszyn*, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2012.
- 237. Żółtowski B., Tylicki H., *Elementy diagnostyki technicznej maszyn*, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Pile, ISBN 978-83-89795-65-6, Piła 2008.
- 238. Żurek J., *Modelowanie nadążnych systemów bezpieczeństwa*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Technologii Eksploatacji-PIB, ISBN 978-83-7204-952-0, Warszawa 2010.
- 239. Zwierzycki W., *Niektóre problemy obliczania niezawodności par ślizgowych*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Maszyny Robocze i Pojazdu”, nr 52, 2001, s.103–118.