

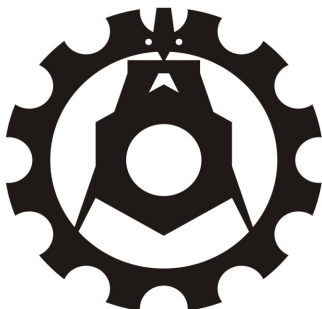
Mieczysław Dziubiński

Systemy badawcze układu rozruchowego w środkach transportu



Systemy badawcze układu rozruchowego w środkach transportu

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Mieczysław Dziubiński

Systemy badawcze układu 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: 978-83-7947-206-2

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

Streszczenie	6
1. Wprowadzenie	8
2. Przegląd konstrukcji rozruszników	10
2.1. Charakterystyki rozruszników szeregowo-bocznikowych.....	13
2.2. Parametry rozruszników.	15
3. Metody wyznaczania charakterystyk mocy rozrusznika.....	22
3.1. Wyznaczanie charakterystyk rozrusznika na stanowisku ZEM–1.....	22
3.2. Wyznaczenie charakterystyk rozrusznika na stanowisku ZEM–2.....	25
3.3. Pomiary momentu i prędkości rozrusznika na stanowisku IME PW.....	27
3.4. Metoda kontroli rozruszników na stanowisku firmy SCHENCK.....	29
3.5. Metoda badania rozrusznika dla stałego momentu obciążenia	33
4. Modelowanie charakterystyk obwodu rozruchowego	36
4.1. Model analityczny obwodu rozruchowego w programie Visual C++.	36
4.2. Model charakterystyk mocy rozrusznika w programie Matlab i Matlab Simulink.....	47
4.3. Model charakterystyk rozrusznika w programie LabView	61
5. Analiza eksploatacyjnego zużycia rozruszników	73
5.1. Modelowanie eksploatacyjnego zużycia elementów rozrusznika.....	78
5.2. Analiza uszkodzeń rozruszników w eksploatacji pojazdów	89
5.3. Analiza typowych uszkodzeń rozruszników	91
6. Eksperymentalne badania rozruszników.....	104
6.1. Pomiary i rejestracja wielkości elektrycznych.....	104
6.2. Pomiary i rejestracja wielkości mechanicznych	106
6.3. Realizacja programu badań rozrusznika na stanowisku D3.....	109
7. Podsumowanie	123
Literatura.....	125
Dodatek.....	136

Systemy badawcze układu rozruchowego w środkach transportu

Słowa kluczowe: rozrusznik silnika spalinowego, zużycie eksploatacyjne, rodzaje uszkodzeń elektrycznych, urządzenia diagnostyczne, rejestracja sygnałów

Streszczenie

Monografia poświęcona jest zagadnieniom związanym z systemami badawczymi układu rozruchowego. Współczesne systemy badawcze związane są z analizą uszkodzeń mających bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo jazdy i występują głównie w podsystemach podwozia i nadwozia. w przypadku układu rozruchowego nie jest monitorowany proces eksploatacji na skutek naturalnego zużycia lub uszkodzenia i nie jest poddawany diagnostyce w stacjach diagnostyczno naprawczych. Decyzja o wykonaniu diagnostyki układu rozruchowego pojazdu podejmowana jest przez użytkownika na podstawie zauważonych podczas eksploatacji objawów uszkodzeń. Istotnym zagadnieniem staje się zgodnie z wymogami OBD II ciągłe dozоровanie każdego układu elektrycznego w pojazdach samochodowych od momentu wczesnej fazy rozwoju uszkodzenia, pojawienia się symptomu uszkodzenia oraz potwierdzonego symptomu o uszkodzeniu. Zgodnie z procedurami i zasadami systemu OBD wymagana jest bieżąca diagnostyka i naprawa oraz ciągłe monitorowanie wraz z sygnalizacją uszkodzenia za pomocą lampki MIL informującej o wystąpieniu uszkodzenia. w rozdziale pierwszym dokonano przeglądu konstrukcji rozruszników, zestawiono ich parametry techniczne oraz schematy elektryczne. w rozdziale drugim przedstawiono metody i urządzenia do wyznaczania charakterystyk mocy przy obciążeniu momentem hamującym. Dokonano przeglądu systemów badawczych krajowych i zagranicznych oraz przedstawiono autorskie opracowania. Zaprojektowane przez autora stanowiska umożliwiają wyznaczenie charakterystyk mocy na podstawie rejestracji wielkości elektrycznych i mechanicznych. Opracowane przez autora cztery systemy pomiarowe rozszerzone zostały o możliwość rejestracji rozkładu pola magnetycznego w badanych rozrusznikach. W monografii zestawiono rodzaje uszkodzeń elementów elektrycznych i mechanicznych dla których zarejestrowano charakterystyki mocy. W pracy zestawiono stanowiska badawcze do rejestracji prądu rozruchu opracowane przez autora.

Test systems of the starting circuit in means of transport

Keywords: internal combustion engine starter, operation wear and tear, types of electrical faults, diagnostic equipment, registration signals

Summary

The monograph is devoted to issues related to the test systems of the starting circuit. Today's test systems are associated with the analysis of defects that have a direct impact on driving safety and occur mainly in the subsystems of the chassis and bodywork. In the case of the starting system the operation process due to natural wear and tear or damage is not monitored or tested in diagnostic and repair stations. The decision to test a vehicle's starting system is made by the user based on the symptoms of damage observed during the operation. In accordance with the requirements of OBD (on-board diagnostics) II an important issue is continuous supervision of any electrical system in vehicles from the early stages of damage, the appearance of damage symptoms and confirmation of the failure symptom. Following the rules and procedures of the OBD system there is a requirement for ongoing diagnostics and repair as well as continuous monitoring and signalling of a damage by the MIL (malfunction indicator lamp), informing of the occurrence of damage. The first chapter reviews the construction of starters, summarises their specifications and wiring diagrams. Chapter 2 presents the methods and equipment for determining the characteristics of the power load braking torque. a review of domestic and foreign testing systems, as well as the author's own approach, is presented in the study. The stands designed by the author allow to define the power characteristics on the basis of registration of electrical and mechanical parameters. The author's four measurement systems have been extended by the possibility of recording magnetic field distribution in the studied starters. The study summarises the types of damage to the electrical and mechanical components for which power characteristics were registered. The study compares the research stands for registering the starting current prepared by the author.

1. Wprowadzenie

Rozwój motoryzacji został w ostatnim okresie znacznie zintensyfikowany przez elektryfikację i elektronizację pojazdów i ich podzespołów [56, 57, 63, 64, 134, 160]. Znacznemu rozszerzeniu pod względem strukturalnym uległo wyposażenie pojazdów związane z ekologią, komfortem i bezpieczeństwem. w związku z tym wzrosło zapotrzebowanie na energię elektryczną w instalacji pokładowej pojazdów, co spowodowało rozwój konstrukcji i minimalizacji gabarytów urządzeń spełniających wiele zadań. Jednym z takich zamierzeń jest konstruowanie kompaktowych prądnico-rozruszników [18, 19, 80–83, 129–133, 146, 147]. Zespolenie układu rozruchowego i ładowania stosowane jest na bazie maszyn prądu stałego. Podejmowane prace nad konstrukcjami prądnico-rozruszników na bazie maszyny synchronicznej o wzbudzeniu hybrydowym od magnesów trwałych i wzbudzeniu elektromagnetycznym na stojanie oraz wyposażeniu w specjalne uzwojenie rozruchowe w wirniku magnesu znajdują zastosowanie jedynie w pojazdach hybrydowych. Dlatego też producenci instalują rozruszniki z typowymi silnikami prądu stałego z magnesami trwałymi i przekładnią planetarną. z punktu widzenia ekologicznego można zauważyć, że duża liczba porannych uruchomień pojazdów przy niskich temperaturach mająca w dużych skupiskach ludzkich może spowodować znaczną koncentrację związków toksycznych na niewielkim obszarze. Przyczyną zwiększonej emisji w fazie zimnego rozruchu jest konieczność wzbogacenia mieszanki paliwowo powietrznej, która niezbędna jest dla prawidłowego rozruchu silnika i jego stabilnej pracy. Wzbogacanie mieszanki jest tym większe im niższa jest temperatura otoczenia, w której silnik samochodu jest uruchamiany i eksploatowany. Użytkownicy samochodów przyzwyczajeni są do bezproblemowych rozruchów zarówno w niskich jak i wysokich temperaturach otoczenia.

Urządzeniem odpowiedzialnym za prawidłowy rozruch silnika jest rozrusznik prądu stałego [100–102], stanowiący integralną część silnika samochodowego. Jego zadaniem jest dokonanie rozruchu, a także wytworzenie momentu elektromagnetycznego wystarczającego do pokonania oporów tarcia tłoków o gładź cylindrów, oporów tarcia w łożyskach układu korbowo-tłokowego, oporów kompresji i dekompresji gazów w cylindrach, oraz nadania masom wirującym silnika spalinowego prędkości obrotowej umożliwiającej regularny zapłon. Rozruszniki samochodowe składają się z silnika elektrycznego, mechanizmu sprzęgającego i zębника. We współczesnych rozrusznikach stosowane są komutatorowe silniki prądu stałego, szeregowo i szeregowo-bocznikowe oraz coraz częściej rozruszniki ze wzbudzeniem od magnesów trwałych. Silniki prądu stałego o wzbudzeniu magnetoelektrycznym najczęściej są wyposażone w przekładnię planetarną, ponieważ zapewnia ona wysoką sprawność, prostą konstrukcję oraz technologię wytwarzania, a także małą objętość. Prawidłowo dobrany rozrusznik musi zapewnić prędkość obrotową wału korbowego, wynoszącą $n > 7,33$ rad/s (70 obr/min). Duże przełożenie pomiędzy wałem rozrusznika, a wałem silnika

spalinowego, pozwala na zastosowanie silnika elektrycznego o odpowiednio małych gabarytach. Charakterystyczną cechą rozrusznika jest moment obrotowy, którego wartość maksymalna w pierwszej fazie rozruchu rośnie $5 \div 7$ – krotnie w miarę zwiększania się prędkości obrotowej rozruchu [100-102]. Jest to cenna zaleta, gdyż największe zapotrzebowanie na moment obrotowy występuje w pierwszej fazie uruchamiania silnika. Zachodzi wtedy przejście z fazy tarcia spoczynkowego do tarcia ruchowego.

Prawidłowa i bezawaryjna praca rozrusznika jest uzależniona od wielu elementów wchodzących w skład jego budowy. Badania przeprowadzone przez autora w Dziale Kontroli Jakości Zakładów Elektrotechniki Motoryzacyjnej w Świdnicy, dowiodły, że najczęstszym powodem nieprawidłowej pracy rozruszników w okresie gwarancyjnym jest eksploatacyjne zużycie tulejek ślizgowych, a także zużycie się szczotek.

Celem naukowym monografii jest analiza strukturalna i funkcjonalna układu rozruchowego obejmująca:

- przegląd konstrukcji rozruszników,
- analizę modelu obwodu rozruchowego,
- analizę eksploatacyjnego zużycia,
- przegląd metod badawczych z wykorzystaniem aparatury pomiarowej,
- wyznaczenie charakterystyk mocy rozruszników,
- analiza prądu rozruchu silników spalinowych.

W monografii „Modelowanie i eksperymentalne badania obwodu rozruchowego w środkach transportu” autor przedstawił modele i wyniki eksperymentalnych badań. Dla osiągnięcia celów naukowych niezbędne było zrealizowanie zadań badawczych, które zostały przedstawione w powyższej monografii w postaci schematu blokowego obejmującego:

1. Opracowanie i zbadanie metod oraz środków technicznych przeznaczonych do dozoru eksploatacyjnego układu rozruchowego.
2. Analiza stanu wiedzy w zakresie eksploatacyjnego zużycia oraz uszkodzeń elementów mechanicznych i elektrycznych układu rozruchowego.
3. Badania laboratoryjne układu rozruchowego.
4. Badania laboratoryjne w celu identyfikacji właściwości poszczególnych sygnałów diagnostycznych.
5. Przeprowadzenie analizy symulacyjnej w oparciu o model numeryczny układu rozruchowego.
6. Zaprojektowanie i wykonanie stanowisk badawczych oraz przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej.
7. Opracowanie koncepcji inteligentnego systemu diagnostyki oraz algorytmu diagnozowania stanu technicznego silnika spalinowego.

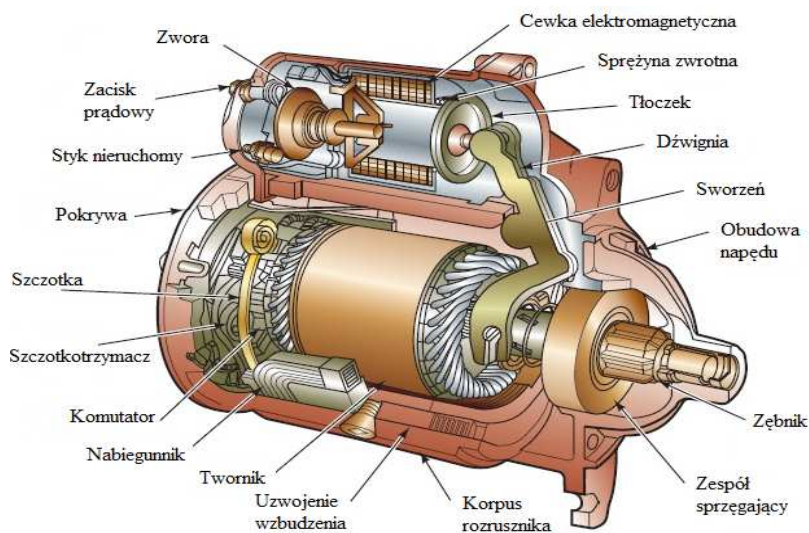
Wymienione wyżej zagadnienia usystematyzowane są w poszczególnych rozdziałach, i przedstawiają szczegółowo podejmowaną problematykę, opartą na

informacjach autoryzowanych serwisów, w których była przeprowadzona analiza eksploatacyjnego zużycia, uszkodzeń i metod diagnozowania układu rozruchowego.

2. Przegląd konstrukcji rozruszników

We współczesnych samochodach osobowych stosowane są rozruszniki elektryczne [42, 112, 122–124], składające się z trzech zasadniczych podzespołów (rys.2.1):

- silnika elektrycznego,
- mechanizmu sprzęgającego (z zębnikiem),
- wyłącznika elektromagnetycznego.



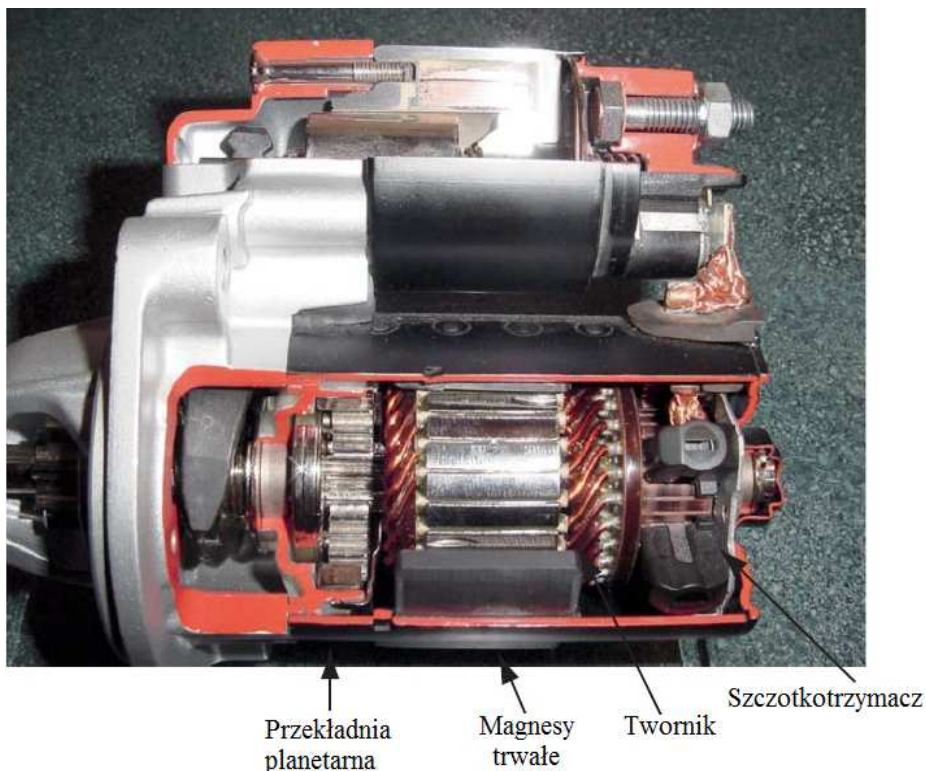
Rys. 2.1. Przekrój rozrusznika z elektromagnesem

W środkach transportu występują następujące rodzaje rozruszników:

- z śrubowo przesuwным zębniakiem,
- z przesuwным wirnikiem,
- z przesuwным zębniakiem,
- z reduktorem,
- aksjalny,
- sprzęgany bezwładnościowo,
- z trwałymi magnesami wzbudzenia,
- z przekładnią planetarną.

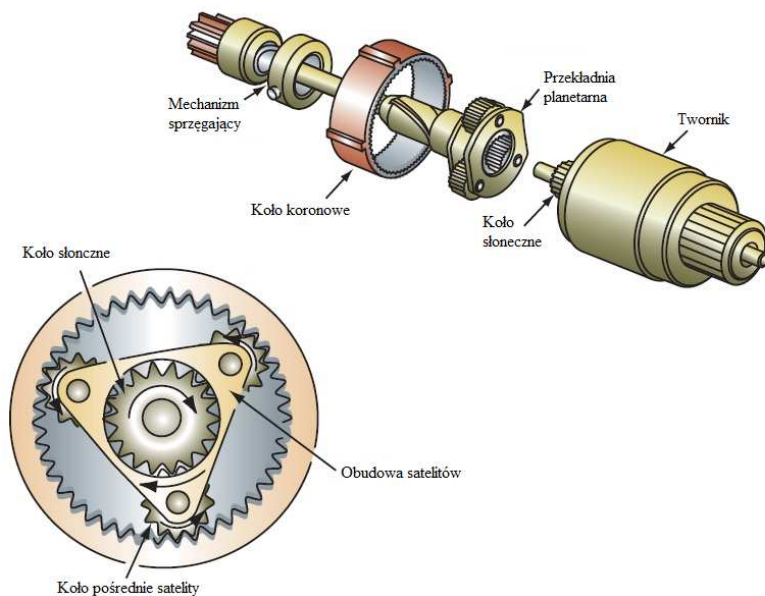
Rozrusznik z przekładnią planetarną

W rozrusznikach typu planetarnego do redukcji prędkości obrotowej wirnika silnika elektrycznego prądu stałego jest stosowana przekładnia planetarna (rys.2.2). Zębnik jest zazębiany dźwignią sprzęgającą tak, jak w rozruszniku konwencjonalnym. Za redukcję prędkości obrotowej silnika elektrycznego prądu stałego odpowiedzialne są trzy satelity i koło słoneczne o uzębieniu wewnętrznym.



Rys. 2.2. Rozrusznik z przekładnią planetarną

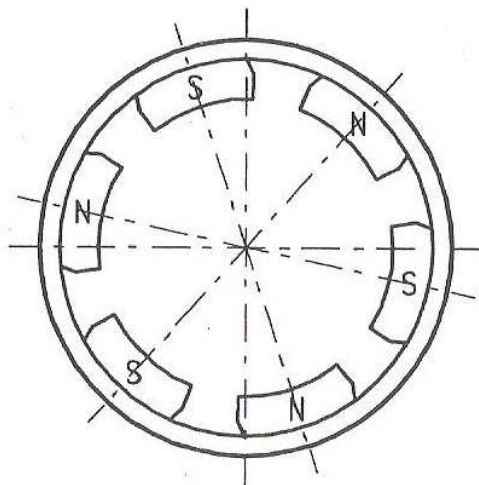
Zastosowanie magnesów trwałych w rozruszniku z przekładnią planetarną zapewnia jego mniejszą wagę, prostszą konstrukcję i mniejsze wytwarzanie energii cieplnej w porównaniu do tradycyjnych nabiegunków. W rozruszniku z magnesami trwałymi zamiast cewek wykorzystuje się cztery lub sześć zestawów pola magnetycznego. Na rysunku 2.3 przedstawiono połączenie wirnika wraz z przekładnią planetarną.



Rys. 2.3. Połączenie wirnika i mechanizmu sprzęgającego z przekładnią planetarną

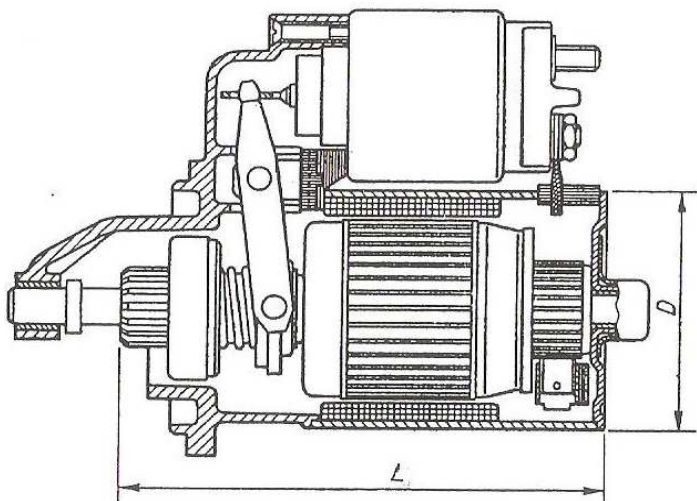
Rozrusznik magnesami trwałymi

Na rys. 2.4 przedstawiono rozmieszczenie magnesów trwałych w stojanie rozrusznika.



Rys. 2.4. Rozmieszczenie magnesów trwałych w stojanie rozrusznika

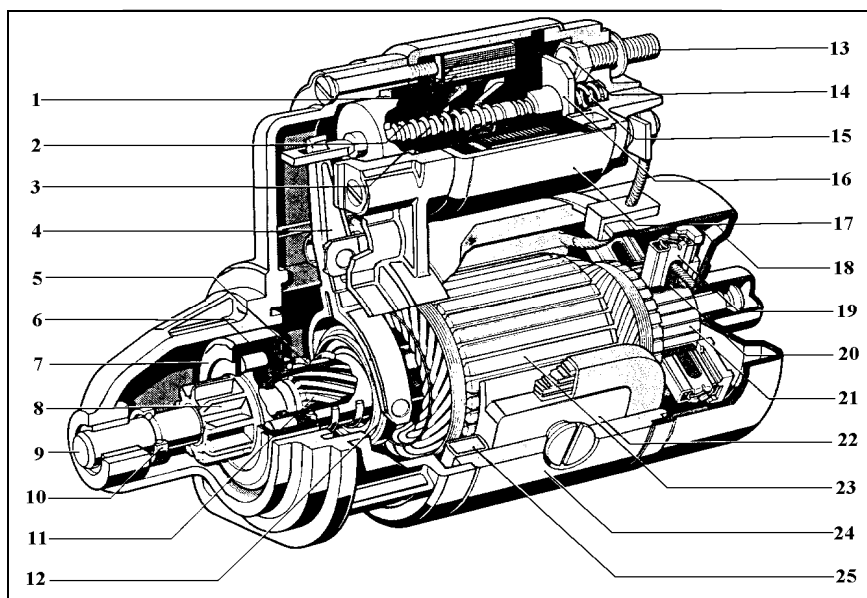
Zastosowanie magnesów trwałych, zastępujących bieguny i nabiegunki oraz uzwojenie wzbudzenia w rozruszniku o budowie klasycznej, umożliwiło zmniejszenie średnicy o ok. 13% i masy o 15% w stosunku do konstrukcji klasycznych ze wzbudzeniem elektromagnesami. Firma Bosch wyprodukowała rozruszniki ze wzbudzeniem magnesami trwałymi o mocy 0,8 kW, 0,9 kW, 1,0 kW oznaczone symbolem DM. Na rysunku 2.5. przedstawiono przekrój rozrusznika typu DM 0,9 kW.



Rys. 2.5. Przekrój rozrusznika ze wzbudzeniem magnesami trwałymi typu DM 0,9 kW

2.1. Charakterystyki rozruszników szeregowo-bocznikowych

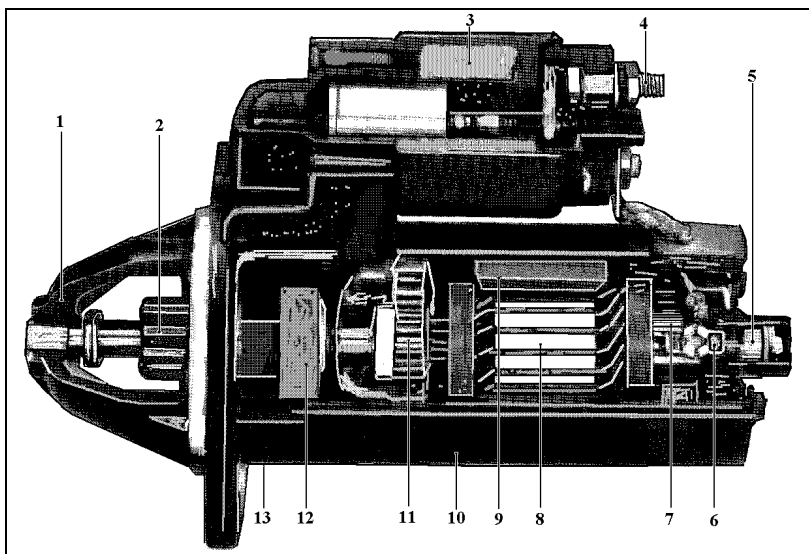
Budowę rozrusznika przedstawia rys. 2.6. Rozrusznik składa się z silnika elektrycznego prądu stałego szeregowego lub szeregowo-bocznikowego, mechanizmu sprzęgającego i zębniaka, który sprzęga się na czas rozruchu z uzębionym wieńcem koła zamachowego silnika spalinowego. Podczas fazy zazębienia z wieńcem koła zamachowego silnika moment napędowy jest przenoszony przez zębniak osadzony na wałku rozrusznika na wał korbowy silnika. Energia potrzebna do rozruchu jest pobierana z akumulatora. Rozrusznik wprawia więc w ruch koło zamachowe silnika. Wywołany w ten sposób ruch obrotowy wału korbowego jest zamieniany na ruch posuwisto-zwrotny tłoków w cylindrach. Rozruszniki elektryczne o budowie konwencjonalnej różnych rodzajów mają podobną zasadę działania, różnią się tylko rozwiązaniem włączania i wyłączania przekładni rozrusznik-silnik (zębniak rozrusznika-wieniec koła zamachowego).



Rys. 2.6. Budowa rozrusznika

- 1 – uzwojenie trzymające, 2 – uzwojenie wciągające, 3 – rdzeń elektromagnetyczny,
 4 – dźwignia, 5 – sprężyna śrubowa, 6 – bieźnia, 7 – osłona, 8 – zębnik, 9 – wałek,
 10 – zabezpieczenie, 11 – tuleja z gwintem trapezowym, 12 – pierścień przewodniczy,
 13 – zacisk prądowy, 14 – styk nieruchomy, 15 – sprężyna, 16 – zwora (styk ruchomy), 17 – obudowa elektrowyłącznika, 18 – pokrywa, 19 – szczotkotrzymacz, 20 – szczotka, 21 – komutator,
 22 – nabiegunki, 23 – twornik, 24 – obudowa, 25 – uzwojenie wzbudzenia

W innych rozwiązaniach rozruszników do redukcji prędkości obrotowej silnika elektrycznego prądu stałego stosowana jest przekładnia planetarna rys. 2.7.



Rys. 2. 7. Rozrusznik z przekładnią planetarną

1 – głowica rozrusznika, 2 – zębnik, 3 – uzwojenie elektromagnesu, 4 – zacisk prądowy, 5 – zabezpieczenie, 6 – szczotkotrzymacz, 7 – komutator, 8 – twornik, 9 – nabiegunnik, 10 – obudowa, 11 – przekładnia planetarna, 12 – dźwignia, 13 – sprężyna śrubowa

2.2. Parametry rozruszników

Znamionowymi elektrycznymi parametrami rozrusznika podawanymi przez producenta są:

1. Moc znamionowa, oddawana przez rozrusznik przy określonym napięciu zasilania,
2. Napięcie znamionowe rozrusznika,
3. Prąd znamionowy pobierany przez rozrusznik rozwijający moc znamionową,
4. Prędkość obrotowa odpowiadająca mocy znamionowej.

Ponadto podaje się prędkość obrotową n i pobór prądu I na biegu jałowym, oraz maksymalną wartość prądu zwarcia. Sprawdzenie tych parametrów odbywa się na rozruszniku wymontowanym z pojazdu. Jeśli ich wartości mieszczą się w granicach podanych przez producenta rozrusznik jest sprawny.

Do parametrów funkcjonalnych rozrusznika zalicza się:

1. Prąd rozrusznika I ,
2. Napięcie na zaciskach U ,
3. Moment obrotowy M ,
4. Prędkość obrotową n ,
5. Moc elektryczną P_e i mechaniczną P_m .

Stan techniczny rozrusznika określany jest przez parametry oceny struktury. Określenie ich bez demontażu jest niemożliwe, stąd do oszacowania przydatności eksploatacyjnej wykorzystywane są parametry funkcjonalne.

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

1. Jednoznaczności (każdej wartości parametru struktury odpowiada tylko jedna, zdeterminowana wartość parametru wyjściowego),
2. Dostatecznej szerokości pola zmian (możliwie duża względna zmiana wartości parametru wyjściowego dla zadanej zmiany wartości parametru struktury),
3. Dostępność (łatwość dokonania pomiaru).

Podczas rozruchu silnika samochodowego wykorzystywana jest energia elektryczna akumulatora, której wielkość charakteryzuje napięcie i natężenie pobieranego prądu. Te dwie wielkości spełniają w dużym stopniu dwa pierwsze warunki oraz w całości trzeci. Pomiar napięcia dokonuje się bezpośrednio na zaciskach rozrusznika, zaś natężenie prądu mierzy się wykorzystując miernik hallotronowy. Badania rozrusznika mogą być prowadzone na stanowisku po wymontowaniu go z pojazdu, choć istnieje możliwość pomiaru tych dwu wielkości w pojeździe bez konieczności czasochłonnego wyjmowania rozrusznika. Iloczyn tych wielkości określa moc elektryczną rozrusznika, która jest parametrem diagnostycznym.

Po wymontowaniu rozrusznika z pojazdu i zamocowaniu go na stanowisku pomiarowym jako parametry diagnostyczne można przyjąć prędkość obrotową i moment obrotowy wytwarzany przez rozrusznik. Nie jest to jednak możliwe przy zamontowanym rozruszniku w pojeździe. Trudność polega na konieczności ciągłej zmiany momentu hamującego aż do zatrzymania wirnika rozrusznika. Dla oceny badanych rozruszników należy porównać charakterystyki podawane przez producenta. Charakterystyki wyznacza się przy wykorzystaniu akumulatorów o różnej pojemności w Ah, które można stosować do rozrusznika (rys. 2.8.).

Dokonując analizy charakterystyk można stwierdzić, że: charakterystyki rozrusznika dla zmiennego obciążenia przyjmują określone wartości, jednak niezależnie od pojemności akumulatora można wyznaczyć (punkt 1), w którym wartości prędkości obrotowej i poboru prądu przez rozrusznik posiadają zbliżone wartości. Pomiar ten wykonuje się dla rozrusznika nie obciążonego i nosi on nazwę pomiaru biegu jałowego. Mechaniczne uszkodzenia rozrusznika, np. nadmierne tarcie w łożyskach ślizgowych, powodują wzrost prądu I oraz zmniejszenie prędkości obrotowej n . Objawy te występują wtedy, gdy rozrusznik nie osiąga prędkości obrotowej biegu jałowego, wykazując przy tym większy od normalnego pobór prądu.

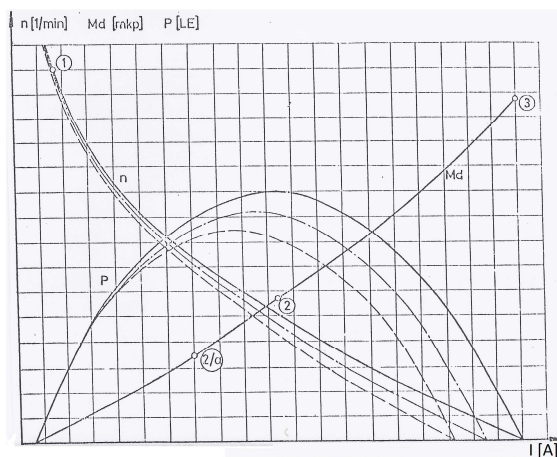
Rozrusznik jest najczęściej silnikiem elektrycznym z wzbudzeniem szeregowo-bocznikowym, którego charakterystykę momentu obrotowego określa wzbudzenie od obu uzwojeń. Analizuje się wyniki pomiarów dla różnych pojemności akumulatora. Jeżeli akumulator nie może dostarczyć energii odpo-

wiadającej charakterystyce momentu obrotowego, należy przyjąć mniejszą wartość oznaczoną na charakterystyce (punkt 2a).

Z rodziny charakterystyk rozrusznika można również określić maksymalny pobór prądu odpowiadający stanowi pełnego zahamowania i przynależną mu wartość momentu obrotowego (punkt 3), jakimi może być obciążony rozrusznik. Uszkodzenia elektryczne, np. zwarcia w uzwojeniach wzbudzenia lub twornika, powodują zmniejszenie momentu obrotowego M dla danej wartości prądu I , w porównaniu z charakterystyką rozrusznika sprawnego i zmniejszenie napięcia U podczas pełnego zahamowania.

Rozstrzygnięcie, czy stan akumulatora jest zadowalający do danego rozrusznika następuje po hamowaniu próbnym podczas, którego obserwuje się spadek napięcia na jego biegunach przy osiąganiu stanu pełnego zahamowania. Jeżeli napięcie akumulatora nie obniży się poniżej 50% wartości znamionowej wynik pomiaru próbnego można, rozpatrywać jako właściwy, w tym przypadku powstają charakterystyczne punkty pracy rozrusznika dla charakterystyk podawanych przez producenta.

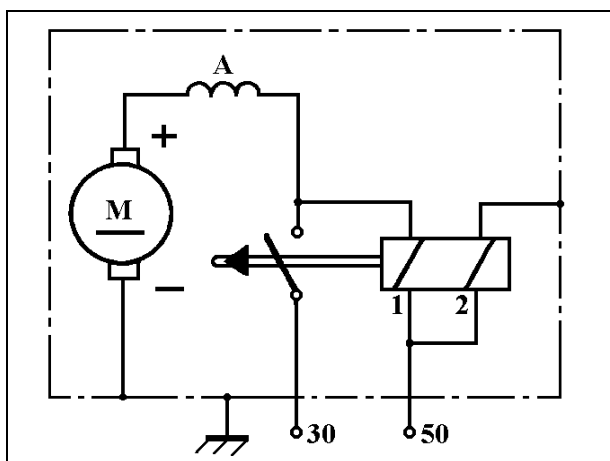
Rozruszniki samochodowe produkowane są na napięcie znamionowe 12 i 24 V. Napięcie 12 V stosuje się dla rozruszników w zakresie mocy 0,6–3,0 kW, natomiast napięcie 24 V stosuje się dla rozruszników w zakresie mocy 4,8–9,0 kW. W tabelach 2.1–2.3 przedstawiono dane techniczne rozruszników. Schematy i charakterystyki rozruszników przedstawiono na rys. 2.9–2.14.



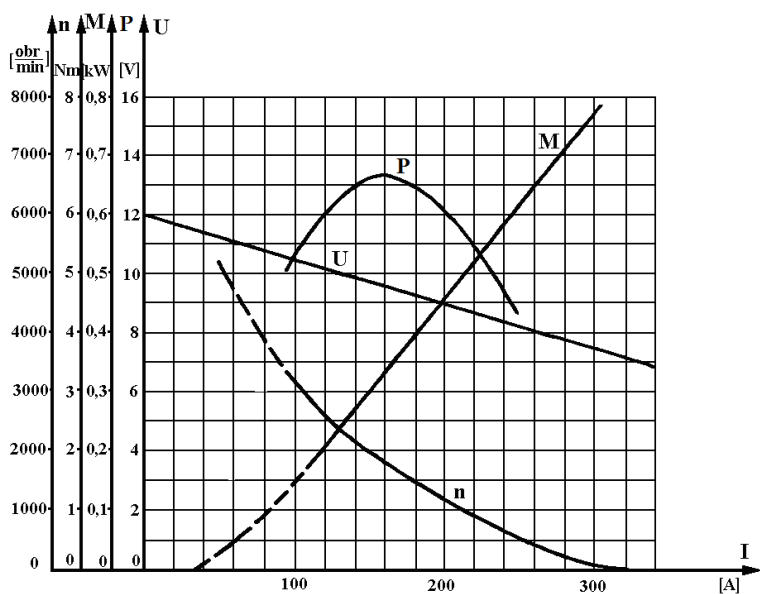
Rys. 2.8. Charakterystyki rozrusznika współpracującego z akumulatorami dla 3 pojemności.
 n – prędkość obrotowa, P – moc, M_d – moment dynamiczny, 1 – punkt pracy biegu jałowego,
 2 – punkt pracy na charakterystyce momentu dla maksymalnej mocy, 2a – punkt pracy dla mniejszego momentu, 3 – maksymalny moment dynamiczny

Tabela 2.1. Rozrusznik R76 12V 0,6 KW

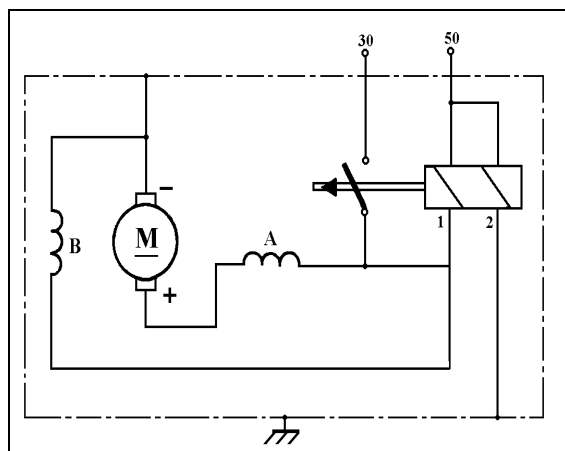
Lp.	Parametry	Jednostka	Wartość
1.	Napięcie znamionowe	V	12
2.	Moc znamionowa	kW	0,6
3.	Pojemność baterii akumulatorów dla mocy znamionowej	Ah	36
4.	Kierunek obrotów	–	lewy
5.	Moment pełnego zahamowania przy poborze prądu $i = 330 \pm 10\text{A}$	Nm	> 8
6.	Pobór prądu przy biegu jałowym ($\geq 7800 \text{ obr./min.}$)	A	< 35
7.	Liczba zębów zębniaka	–	9
8.	Moduł	mm	2,116
9.	Kąt przyporu	–	12°
10.	Masa	kg	~4,0



Rys. 2.9. Schemat elektryczny rozrusznika R 76
A – uzwojenie szeregowe rozrusznika, 1 – uzwojenie wciągające wyłącznika,
2 – uzwojenie podtrzymujące wyłącznika



Rys. 2.10. Charakterystyki elektryczne rozrusznika R 76

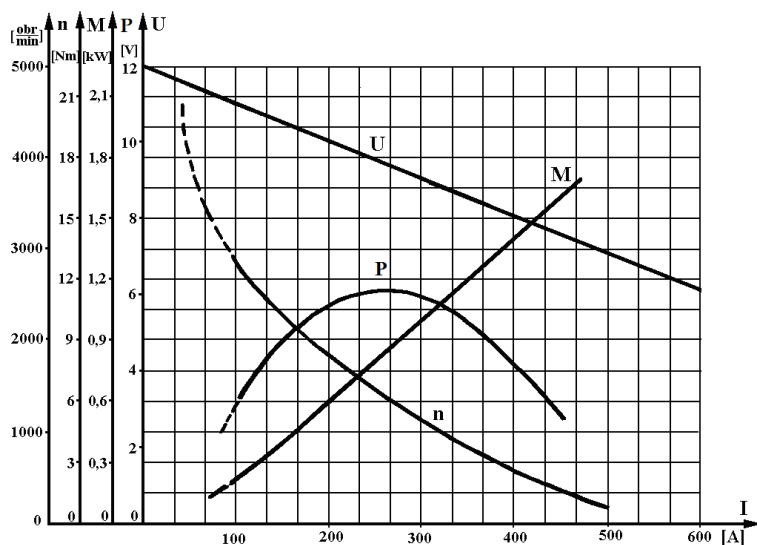


Rys. 2.11. Schemat elektryczny rozrusznika E100N

A – uzwojenie szeregowe rozrusznika, B – uzwojenie bocznikowe rozrusznika,
1 – uzwojenie wciągające wyłącznika, 2 – uzwojenie podtrzymujące wyłącznika

Tabela 2.2.Rozrusznik E100, E100N 12V 1,5 kW

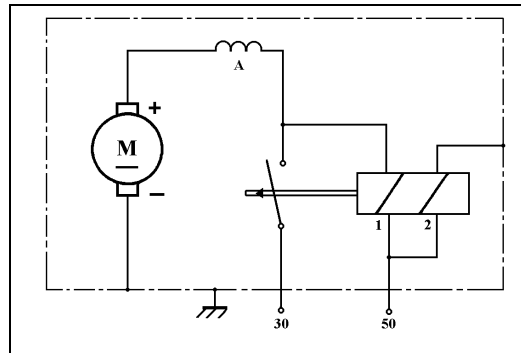
Lp.	Parametry	Jednostka	Wartość
1.	Napięcie znamionowe	V	12
2.	Moc znamionowa	kW	1,5
3.	Pojemność baterii akumulatorów dla mocy znamionowej	Ah	60
4.	Kierunek obrotów	–	prawy
5.	Moment pełnego zahamowania przy poborze prądu $i = 540 \pm 20$ A	Nm	>19,6
6.	Pobór prądu przy biegu jałowym (5000–6000 obr/min)	A	<65
7.	Liczba zębów zębnika	–	9
8.	Moduł	mm	2,5
9.	Kąt przyporu	–	20°
10.	Masa	kg	ok. 8,7



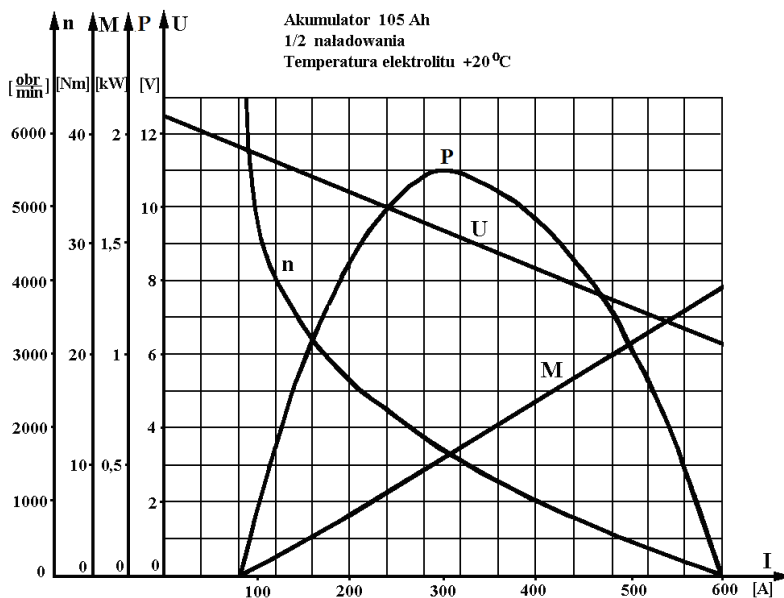
Rys. 2.12. Charakterystyki elektryczne rozrusznika E100N

Tabela 2.3.Rozrusznik R5b 12V 1,5 kW

Lp.	Parametry	Jednostka	Wartość
1.	Napięcie znamionowe	V	12
2.	Moc znamionowa	kW	1,5
3.	Pojemność baterii akumulatorów dla mocy znamionowej	Ah	105
4.	Kierunek obrotów	–	prawy
5.	Moment pełnego zahamowania przy poborze prądu <600 A	Nm	> 19,6
6.	Pobór prądu przy biegu jałowym(5000–7000 obr/min)	A	< 85
7.	Liczba zębów zębniaka	–	9
8.	Moduł	mm	3
9.	Kąt przyporu	–	15°
10.	Masa	kg	10,8



Rys. 2.13. Schemat elektryczny rozrusznika R5
A – uzwojenie szeregowe rozrusznika, 1 – uzwojenie wciągające wyłącznika,
2 – uzwojenie podtrzymujące wyłącznika



Rys. 2.14. Charakterystyki elektryczne rozrusznika R5

3. Metody wyznaczania charakterystyk mocy rozrusznika

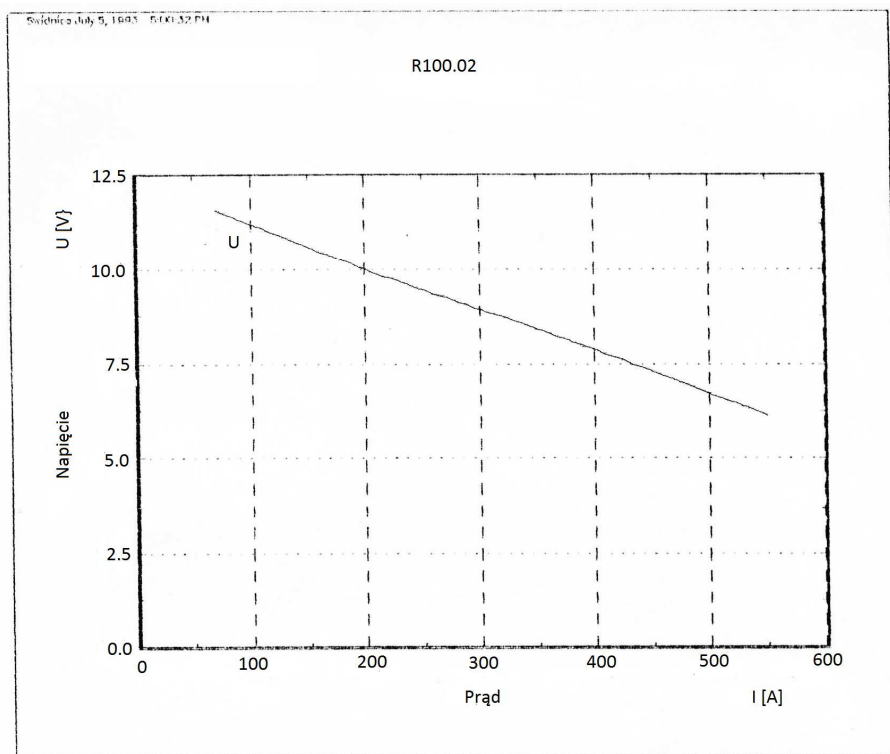
W pracy przeprowadzono analizę metod badawczych do celów diagnostycznych z wykorzystaniem stanowisk badawczych produkowanych przez krajowe i zagraniczne firmy oraz będące na wyposażeniu laboratoriów poszczególnych uczelni.

3.1. Wyznaczanie charakterystyk rozrusznika na stanowisku ZEM – 1

W laboratorium Zakładów Elektrotechniki Motoryzacyjnej w Świdnicy wykorzystywano stanowisko uniwersalne do badania rozruszników typu AB 473 wykonane przez Centralny Ośrodek Konstrukcyjno-Badawczy Przemysłu Motoryzacyjnego w Warszawie. Stanowisko umożliwiało badanie rozruszników produkowanych w kraju. W skład stanowiska wchodził pulpit sterowniczy z miernikami oraz zespół zasilania. Stół pomiarowy posiadał podstawę, na której były mocowane rozruszniki. W przedniej części stołu do podstawy zamocowano trzpienie przeznaczone do osadzania wymiennych wsporników dla różnych rozruszników. Koło zamachowe było opasane taśmą hamulca, zaciskaną

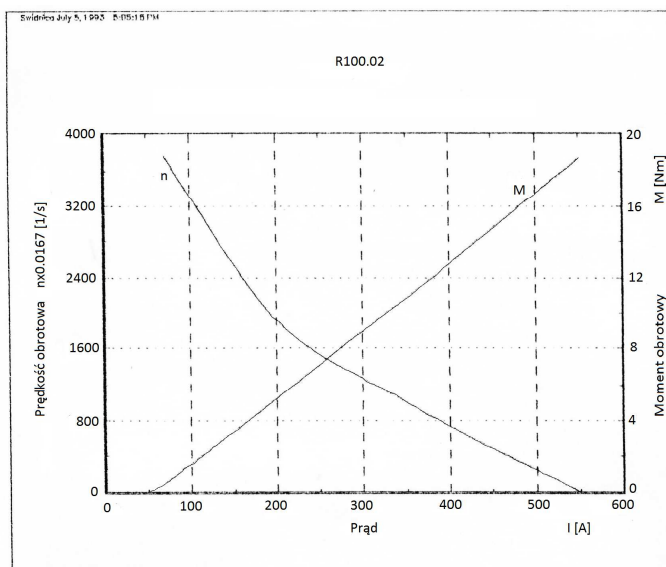
za pomocą dźwigni ręcznej. Dźwignia ręczna hamulca posiadała zacisk 50 umożliwiający zatrzymanie rozrusznika w dowolnym położeniu.

Każdy stół badawczy wyposażono w wentylator do chłodzenia hamulca. Pulpit sterowniczy zawierał mierniki napięcia, prądu, prędkości obrotowej i momentu rozrusznika, liczniki czasu pracy rozruszników oraz urządzenia sterujące pracą stanowiska. Czas trwania pomiaru nastawiany był na pulpicie sterowniczym za pomocą wyłącznika czasowego. Po upływie nastawionego czasu trwania pomiaru wyłącznik rozłączał zasilanie rozrusznika i koło zębate rozrusznika samoczynnie wyłączało się z zazębienia. w czasie trwania pomiaru rejestrowane były: moment obrotowy, prędkość obrotowa oraz napięcie zasilania rozrusznika w funkcji natężenia prądu. Wybrane charakterystyki rozrusznika przedstawiono na rys. 3.1. i 3.2.



Rys. 3.1. Charakterystyka napięcia na zaciskach rozrusznika w funkcji pobieranego prądu

Po zakończeniu próby koło zamachowe wraz z wirnikiem zatrzymywane było za pomocą hamulca. Wentylator chłodzący hamulec był włączany samoczynnie z chwilą uruchomienia pomiaru, zaś wyłączany przez wyłącznik czasowy z możliwością programowania w granicach od 1 do 30 minut.



Rys. 3.2. Charakterystyki rozrusznika w funkcji pobieranego prądu

Stanowisko ZEM 1 zasilano z sieci elektrycznej trójfazowej na napięcie 3x400/230 V, 50 Hz. Rozrusznik zasilany był za pośrednictwem transformatora i układu prostowniczego o charakterystyce obciążeniowej zbliżonej do charakterystyki akumulatora samochodowego właściwego dla badanego rozrusznika.

Wadami tej metody był brak:

1. Możliwości rejestracji mocy w funkcji prądu pobieranego przez rozrusznik $P = f(I)$,
2. Wzorców diagnostycznych,
3. Uniwersalności mocowania rozruszników.

3.2. Wyznaczanie charakterystyk rozrusznika na stanowisku ZEM – 2

W Zakładach Elektrotechniki Motoryzacyjnej w Świdnicy, na końcu linii montażowej rozrusznika E80 znajdowały się dwa stanowiska do końcowej kontroli rozruszników produkcji włoskiej firmy Bertola z Mediolanu. Na stanowiskach realizowano automatyczną serię pomiarów dla rozruszników.

Każde z stanowisk umożliwiało wykonanie indywidualnego programu badań:

Na stanowisku pierwszym realizowano następujące pomiary:

1. Kontrolę napięcia zamknięcia styków wyłącznika elektromagnetycznego przy zębniku zablokowanym osiowo,
2. Pomiar prądu pobieranego przez uzwojenie wciągające wyłącznika elektromagnetycznego,
3. Pomiar prądu pobieranego przez uzwojenie podtrzymujące wyłącznika elektromagnetycznego,
4. Pomiar odległości między zębnikiem w położeniu spoczynkowym a kołnierzem mocującym rozrusznik,
5. Pomiar przesunięcia zębника w czasie załączania,
6. Praca rozrusznika na biegu jałowym,
7. Pomiar prędkości obrotowej na biegu jałowym,
8. Pomiar prądu pobieranego przez rozrusznik na biegu jałowym.

Jeżeli jeden z parametrów znajduje się poza zakresem rozrusznik zostaje oznakowany automatycznie.

Program badań na stanowisku drugim:

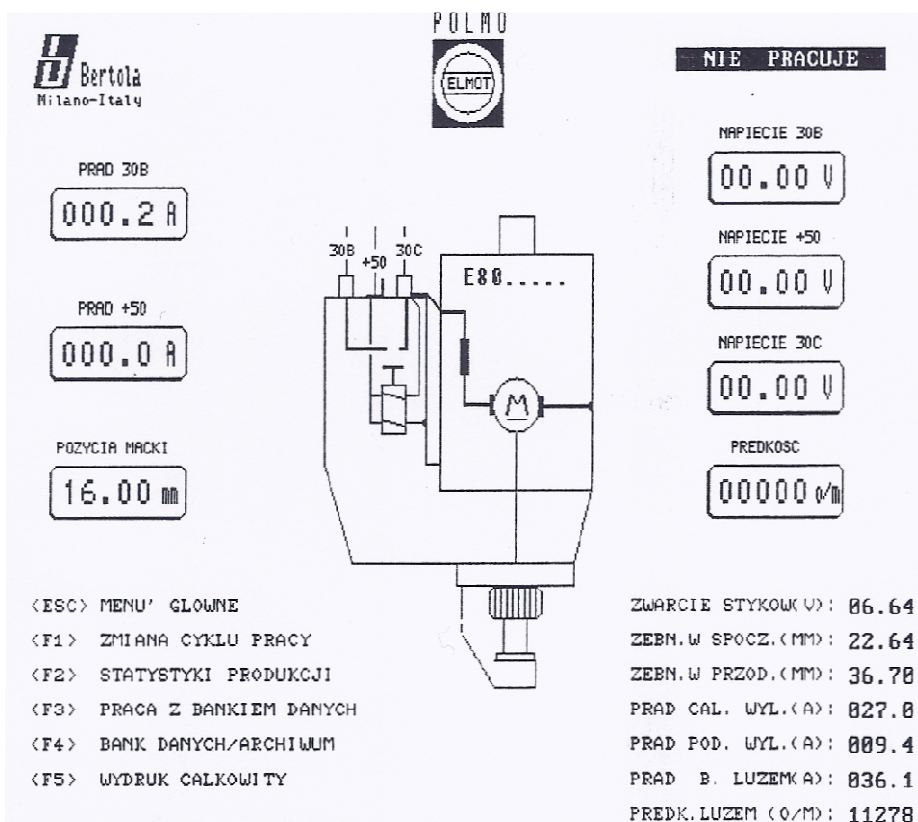
1. Pomiar prądu pobieranego przez rozrusznik,
2. Pomiar momentu obrotowego rozrusznika,
3. Pomiar napięcia na zaciskach rozrusznika,
4. Pomiar prędkości obrotowej,
5. Pomiar mocy (rozsusznik zostaje oznakowany, jeśli moc nie uzyskuje minimalnej wartości),
6. Pomiar spadku napięcia na stykach wyłącznika elektromagnetycznego,
7. Kontrola napięcia otwarcia styków wyłącznika elektromagnetycznego.

Do parametrów, które znajdują się poza dopuszczalną tolerancją i eliminują rozrusznik należą:

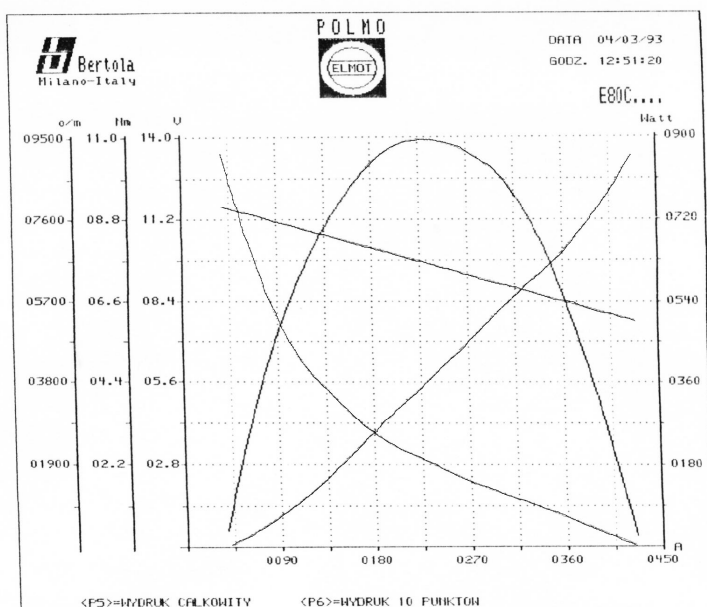
1. Wartość pobranego prądu rozrusznika zablokowanego,
2. Wartość maksymalnego momentu (dla zablokowanego wirnika),
3. Wartość maksymalnej mocy,
4. Spadek napięcia na stykach wyłącznika elektromagnetycznego,
5. Napięcie otwarcia styków wyłącznika elektromagnetycznego.

Zestawienie wyników z przeprowadzonych pomiarów przedstawia rys.3.3.

Zestawienie wyników: prędkości, mocy, momentu oraz napięcia w funkcji prądu przedstawia rys.3.4.



Rys. 3.3. Zestawienie wyników pomiarów na stanowisku BERTOLA



Rys. 3.4. Charakterystyki badanego rozrusznika na stanowisku BERTOLA

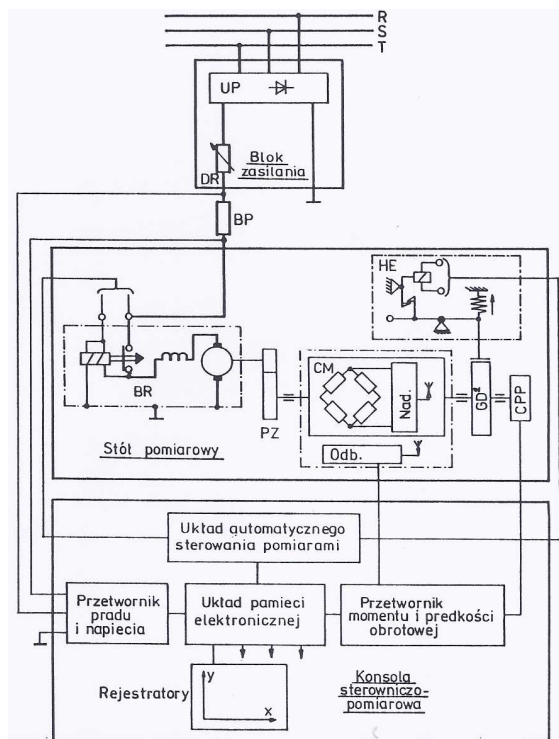
3.3. Pomiary momentu i prędkości rozrusznika na stanowisku IME PW

W Zakładzie Konstrukcji Urządzeń Elektrycznych Instytutu Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej zaprojektowano stanowisko badawcze z przeznaczeniem do wyznaczenia charakterystyk statycznych i dynamicznych rozruszników silników spalinowych pojazdów samochodowych.

Aby uzyskać jednoznaczne wyniki pomiarów i uniknąć korekcji temperaturowej należy zapewnić pomiar punktowy ustabilizowanie cieplne maszyny w temperaturze otoczenia $293 \pm 5K$ przed pomiarem w każdym punkcie. Pomiary polegają na rejestracji wartości momentu i prędkości obrotowej, prądu i napięcia na zaciskach maszyny w każdym z punktów pomiarowych podczas pracy rozrusznika z różnym obciążeniem momentem hamującym. Należy zarejestrować odpowiednią liczbę punktów, aby otrzymać charakterystyki rozrusznika. Przed każdym pomiarem rozrusznik powinien posiadać temperaturę otoczenia.

Przy pomiarze ciągłym należy przeprowadzić ustabilizowanie cieplne maszyny w temperaturze $293 \pm 5K$. Pomiary tą metodą polegają na ciągłej pracy rozrusznika, począwszy od momentu zahamowania, gdy rozrusznik jest obciążony dodatkowym momentem bezwładności. Moment obrotowy, prędkość obrotową, prąd i napięcie na zaciskach maszyny rejestruje się automatycznie.

Przy wykonywaniu pomiarów rozrusznik BR umocowany w uchwycie uniwersalnym (rys. 3.5) połączony jest przez zębniak z kołem zębatym napędzanym PZ. Koło zębate PZ połączone z wałkiem pomiarowym, na którym naklejoną jest tensometryczny czujnik momentu obrotowego CM, napędza za jego pośrednictwem koło zamachowe GDZ o regulowanym momencie bezwładności. Koło to jest wyposażone w hamulec cierny zwalniany elektromagnetycznie.



Rys. 3.5. Schemat funkcjonalny stanowiska: UP – układ prostowniczy, DR – rezystor nastawny symulujący rezystancję wewnętrzną akumulatora, BP – boczniak pomiarowy, BR – badany rozrusznik, PZ – koło zębate, CM – czujnik tensometryczny momentu obrotowego, GDZ – koło zamachowe o regulowanym momencie bezwładności, CPP – czujnik położenia kąowego, HE – hamulec cierny zwalniany elektromagnetycznie, Nad. – nadajnik radiotelemetryczny, Odb. – odbiornik radiotelemetryczny

Rozrusznik BR jest zasilany z akumulatora o pojemności, zalecanej przez producenta. Pomiary ciągłe momentu obrotowego, prędkości obrotowej, napięcia zasilającego i prądu obciążenia realizowano przez układ automatycznej rejestracji.

Rzeczywiste wartości pomiarowe ulegają przekształceniu na sygnały standardowe w przetwornikach momentu i prędkości obrotowej oraz prądu i napięcia, a następnie przetworzone są na sygnał cyfrowy i są zapisywane

w układzie pamięci. Po tym zapisie są ponownie przekształcane na sygnał analogowy przy zmienionej podstawie czasu i rejestrowane przez rejestratory.

Pomiary mogą być wykonywane w cyklu sterowanym automatycznie lub ręcznie. W pierwszym z nich następuje samoczynne załączenie rozrusznika, uruchomienie układu pamięci elektronicznej, odblokowanie hamulca, wyłączenie zasilania. W drugim cyklu układ sterujący procesem pomiarowym wymaga ręcznego uruchomienia każdego z tych urządzeń.

Układ pomiarowy wielkości mechanicznych składa się z czujnika tensometrycznego momentu obrotowego (CM) i cyfrowego czujnika położenia kąтового (CPP) oraz przetwornika momentu i prędkości obrotowej. Czujnik (CM) połączony jest w układzie pełnego mostka tensometrycznego naklejonego na wałku pomiarowym z radiotelemetrycznym przesyłaniem sygnału pomiarowego.

Moment obrotowy powoduje skręcanie wałka pomiarowego oraz odkształcenia tensometrów i zmianę ich rezystancji, a w konsekwencji niezrównoważenie mostka. Napięcie mostka po wzmacnieniu we wzmacniaczu różnicowym steruje pracą nadajnika radiowego (Nad.). Nadawcza antena wirująca emituje sygnał. Sygnał z nieruchomej anteny odbiorczej jest przekazywany do odbiornika (Odb.).

Do pomiaru prędkości obrotowej używany jest czujnik obrotowo-impulsowy, przetwarzający kąt obrotu na liczbę impulsów. Impulsy wyjściowe są kształtowane przez układ formujący, na którego wyjściu otrzymuje się impulsy o stałej amplitudzie i czasie trwania. Częstotliwość impulsów zależy liniowo od prędkości obrotowej.

Skonstruowany system automatycznego sterowania procesem pomiarowym zapewnił odpowiednią dokładność pomiarów i skrócenie czasu badań. Układ elektronicznej pamięci nie zapewnia jednak przechowywania wzorców diagnostycznych, a zastosowane rejestratory charakteryzują się dużą awaryjnością.

3.4. Metoda kontroli rozruszników na stanowisku firmy SCHENCK

Niemiecka firma Carl Schenck AG wprowadziła metody badania silników elektrycznych bazującą na wykorzystaniu komputerów. Są to trzy komputerowo wspomagane metody badawcze:

- Metoda identyfikacji parametrów,
- Analiza wibroakustyczna,
- Techniczne diagnozowanie wad.

Stanowisko badawcze wykorzystywane jest przy końcowej kontroli jakości produkcji rozruszników i pozwala na znaczne skrócenie czasu badań przy jednoczesnym rozszerzeniu ich zakresu.

Zakres końcowej kontroli jakości rozruszników elektrycznych w produkcji wielkoseryjnej obejmuje jeden lub kilka z następujących etapów:

1. Pomiar mocy,
2. Próba rozruchu i wzrokowa kontrola jakości (np. iskrzenie szczotek),

3. Badania osłuchowe (ocena subiektywna),
4. Pomiar natężenia hałasu,
5. Pomiar i analiza drgań,
6. Sprawdzenie jakości izolacji,
7. Badania specjalne.

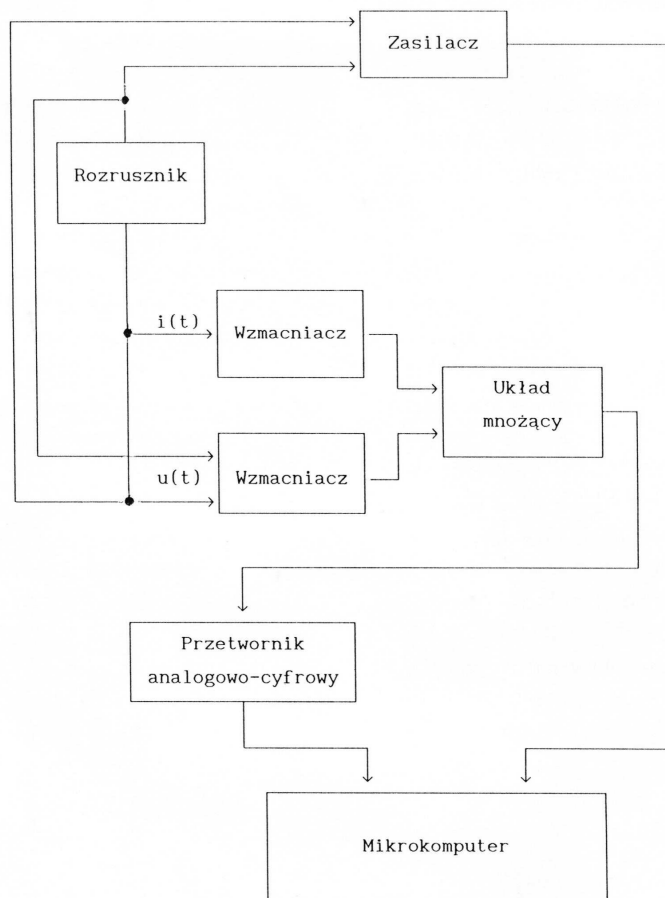
Badania prowadzone były na półautomatycznych stanowiskach pomiarowych, wymagających złożonej obsługi. Do pomiaru mocy stanowiska wyposażone są w odpowiedni hamulec z silnikiem prądu stałego, połączony z układem pomiarowym momentu obrotowego za pośrednictwem wału skrętnego. Utrzymanie stałej dokładności stanowiska wymagało systematycznego nadzoru i kalibracji. Decyzje kwalifikujące rozruszniki jako dobre lub złe, w szczególności przy badaniach osłuchowych, podejmuje pracownik obsługujący stanowisko. Nie są produkowane stanowiska automatycznego diagnozowania stanu rozrusznika i ustalania rodzaju uszkodzenia w wadliwym rozruszniku. Stanowisko nie posiada możliwości opracowywania i systematycznej obróbki wyników badań i informacji o rodzaju stwierdzonych uszkodzeń.

Głównym celem badania rozruszników z wykorzystaniem metody identyfikacji parametrów jest uzyskanie informacji o wielkościach bezpośrednio lub pośrednio mierzonych. Poza bezpośrednio mierzonymi wielkościami (np. natężenie prądu, napięcie) pozostałe parametry silnika określane są pośrednio, drogą rozwiązania modelu matematycznego.

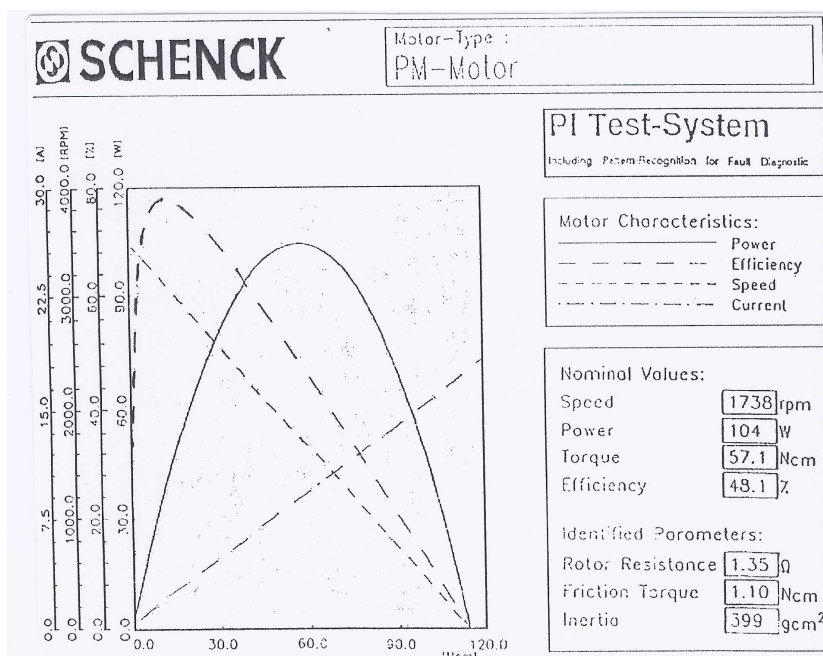
Model rozrusznika, opisany programami zawartymi w pamięci komputera, "podłączony jest równolegle" do badanego rozrusznika. Do modelu i do rozrusznika doprowadzany jest identyczny, odpowiednio sterowany, sygnał wejściowy. Zakłócony sygnał wyjściowy obiektu porównywany jest z sygnałem modelu. Po przeanalizowaniu i obróbce wyników wszystkich pomiarów parametry modelu odpowiadają fizycznym parametrom rozrusznika. Otrzymany w ten sposób model może następnie służyć do opisu i oceny jakości badanego rozrusznika np. drogą określania charakterystyk statycznych. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego modelu matematycznego badania rozruszników mogą być przeprowadzane bez zastosowania obciążenia zewnętrznego (układ z pomiarem momentu), eliminowane są uciążliwe operacje wstępne a w czasie badań silnik obciążany jest własnym momentem bezwładności.

Pomiar mocy nie wymaga stosowania dodatkowego toru pomiarowego. Opracowana w tym celu metoda pozwala na określenie mocy z dokładnością 0,1% na podstawie pomiaru wartości prądu i napięcia. W czasie badań układ zasilania wymusza cykle przyspieszenia i hamowania oraz pomiar prędkości obrotowej wirnika, dzięki czemu rozrusznik obciążany jest własnym momentem bezwładności. Zbieranie danych pomiarowych w trakcie badań dynamicznych trwa ok. 0,5s. Określenie parametrów trwa ok. 1 s. Rezultatem badań są charakterystyki rozrusznika przedstawione na rys. 3.7.

Na rys. 3.6. przedstawiony jest przykładowy schemat stanowiska pomiarowego.



Rys. 3.6. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego do badania rozrusznika



Rys. 3.7. Przykładowa charakterystyka badanego silnika

Czas potrzebny na wykreślenie pełnych charakterystyk nie przekracza 2s.

Nawet najdokładniejsze pomiary wielkości elektrycznych nie gwarantują wykrycia wszystkich rodzajów uszkodzeń rozrusznika. Nerozpoznawalne dla tych pomiarów są następujące wady:

1. Niewyrównoważenie wirnika,
2. Osiowy luz wirnika,
3. Uszkodzenie przekładni,
4. Uszkodzenie łożysk,
5. Ocieranie uzwojeń itp.

Uszkodzenia te można zidentyfikować wykorzystując metody wibroakustyczne. W czasie badań wibroakustycznych wyniki pomiarów hałasu i drgań poddawane są obróbce komputerowej przy użyciu metod analizy sygnałów. Uzyskane w ten sposób informacje przetwarzane są w wielkości tworzące zbiór, charakteryzujący stan danego rozrusznika. Podczas pomiarów porównywany jest obraz z wzorcowymi obrazami, odpowiadającymi różnym rodzajom stanów rozrusznika. Czas pomiaru i diagnozy nie przekracza 1 s.

Obrazy wzorce tworzone są na etapie uruchamiania systemu. Do pamięci układu pomiarowego wprowadzane są dane odpowiadające rozrusznikom bez

wad i posiadającym ściśle określone typy uszkodzeń. Dzięki temu system może być wykorzystywany do badania wielu rodzajów rozruszników.

Istnieje jednak pewna grupa wad rozruszników, które mogą być wykryte drogą pomiarów elektrycznych. Należą do nich między innymi:

1. Wady w uzwojeniach,
2. Iskrzenie szczotek,
3. Uszkodzenia komutatora,
4. Błędy strefy neutralnej.

Wykrywanie tych wad możliwe jest z zastosowaniem metody technicznego diagnozowania wad. Podczas biegu jałowego rozrusznik obciążany jest dynamicznie momentem bezwładności własnego wirnika (dzięki specjalnemu sterowaniu napięciem zasilania), a dane pomiarowe zbierane są i obrabiane przez komputer. W wyniku tej obróbki powstaje zbiór charakterystyk rozrusznika (zbiór parametrów), który porównywany jest z charakterystykami wzorcami, przechowywanymi w pamięci.

3.5. Metoda badania rozrusznika dla stałego momentu obciążenia

Krajowe stanowiska do badania rozruszników S-2ES oraz SE-7 nie posiadają możliwości regulacji momentu obciążenia (rys.3.8, 3.9)

Oba stanowiska umożliwiają kontrolę rozrusznika w postaci rejestrowanych wielkości elektrycznych napięcia, natężenia prądu na biegu jałowym oraz dla zatrzymanego wirnika, czyli dla stanu zwarcia. Wadą stanowisk jest brak możliwości rejestracji momentu podczas hamowania rozrusznika.

Stanowiska firm OPAL (rys. 3.10) i TOPAZ (rys. 3.11) posiadają podobne możliwości pomiarowe bez rejestracji zmiennego obciążenia rozrusznika.



Rys.3.8. Stanowisko do badania rozruszników S – 2ES



Rys. 3.9. Stanowisko do badania rozruszników SE – 7



Rys.3.10. Stanowisko do badania rozruszników OPAL

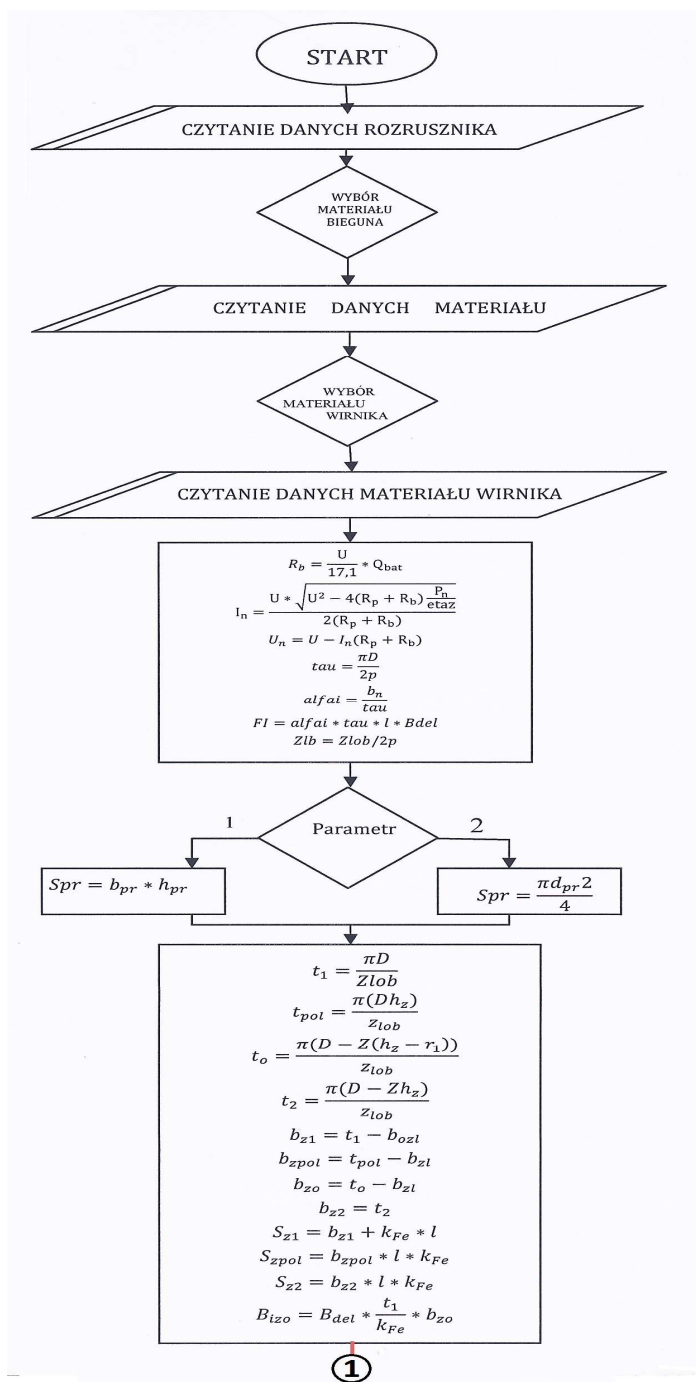


Rys.3.11. Stanowisko do badania rozruszników TOPAZ

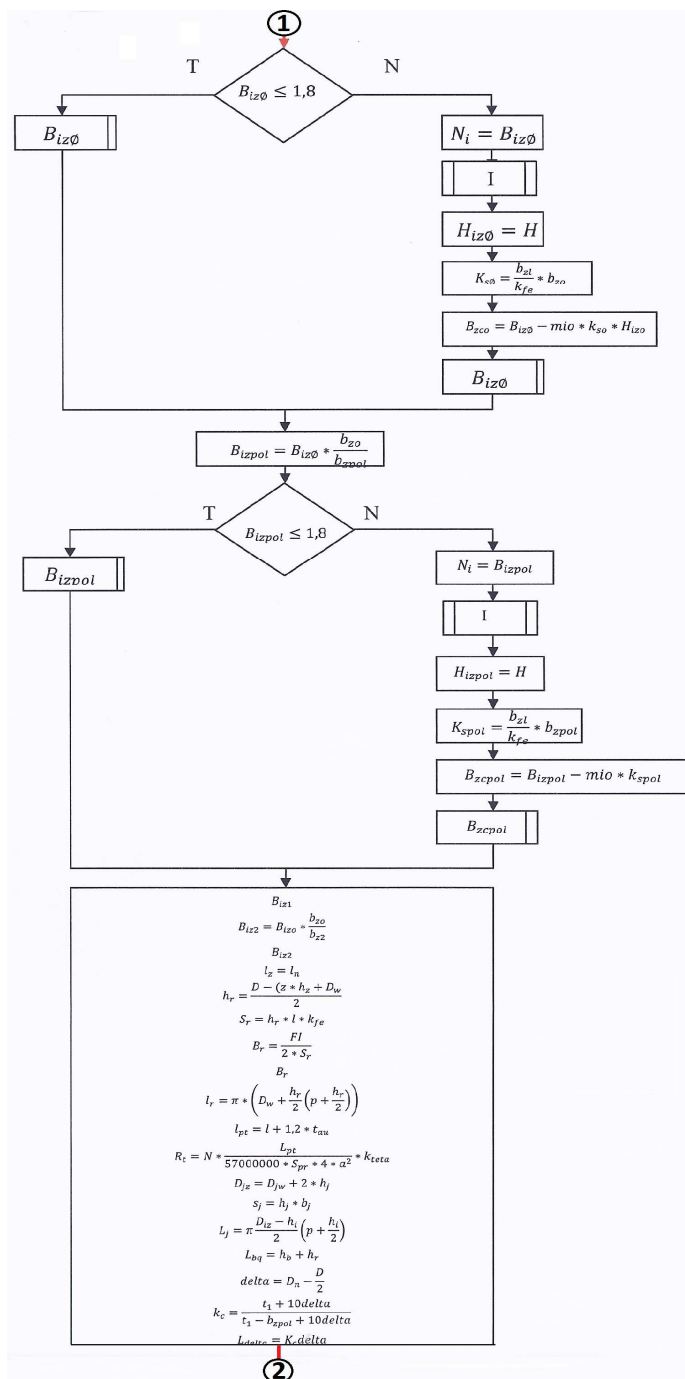
4. Modelowanie charakterystyk obwodu rozruchowego

4.1 Model analityczny obwodu rozruchowego w programie Visual C++

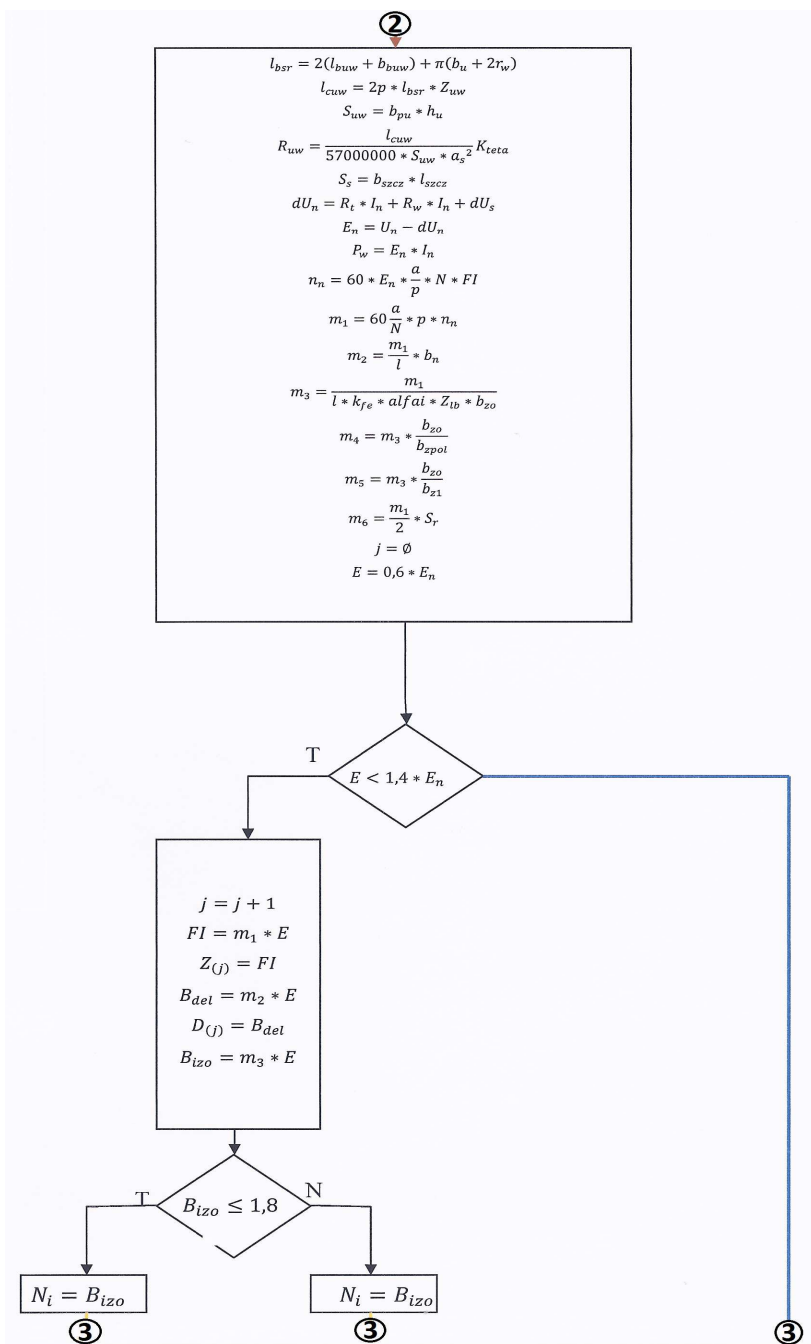
Model analityczny obwodu rozruchowego został opracowany przez autora [34–37] z wykorzystaniem teorii maszyn elektrycznych pojazdów samochodowych [61, 79, 86, 103, 146, 147] oraz analizy parametrów rozruszników samochodach o magnesach trwałych [20–23, 32]. Modelowanie charakterystyk rozrusznika rozpoczyna się od wprowadzenia danych: wybór materiałów magnetycznych biegunów i wirnika. Obliczenia elektromagnetyczne obejmują: obliczenia uzwojenia wzbudzenia, obliczenia komutatora oraz sprawdzenie czy maszyna spełnia wymagane parametry elektromagnetyczne i elektromechaniczne. Celem obliczenia obwodu magnetycznego jest wyznaczenie przepływu na jeden biegun jako sumy napięć magnetycznych na poszczególnych odcinkach obwodu. Przepływ ten jest potrzebny do wymuszenia strumienia magnetycznego ϕ zapewniającego powstanie w uzwojeniu twornika napięcia źródłowego o określonej wartości. Na podstawie rysunku konstrukcyjnego poprzecznego przekroju maszyny w części stojanowej w obwodzie magnetycznym obliczenia przeprowadza się dla: nabiegunnika, rdzenia bieguna, szczeliny powietrznej między rdzeniem i jarzmem oraz jarzma. W części wirnikowej obliczenia obejmują obwód magnetyczny zębów twornika i rdzeń twornika. W dalszej kolejności obliczane są charakterystyki biegu jałowego $E = f(F_{\Sigma})$, na podstawie których wyznacza się charakterystykę magnesowania $B_{\delta} = f(F_{\Sigma})$ oraz charakterystykę przejścia $E = f(F_{\delta + z})$. W dalszej części przeprowadza się obliczenia przy obciążeniu maszyny uwzględniając wpływ reakcji twornika na pole biegunów głównych. Następnie wyznacza się: straty, sprawność i moc rozrusznika dla różnych obciążeń prądowych. Model analityczny rozrusznika samochodowego przedstawiono na rys.4.1–4.8. Oznaczenia poszczególnych wielkości zestawiono w tabeli 4.1.



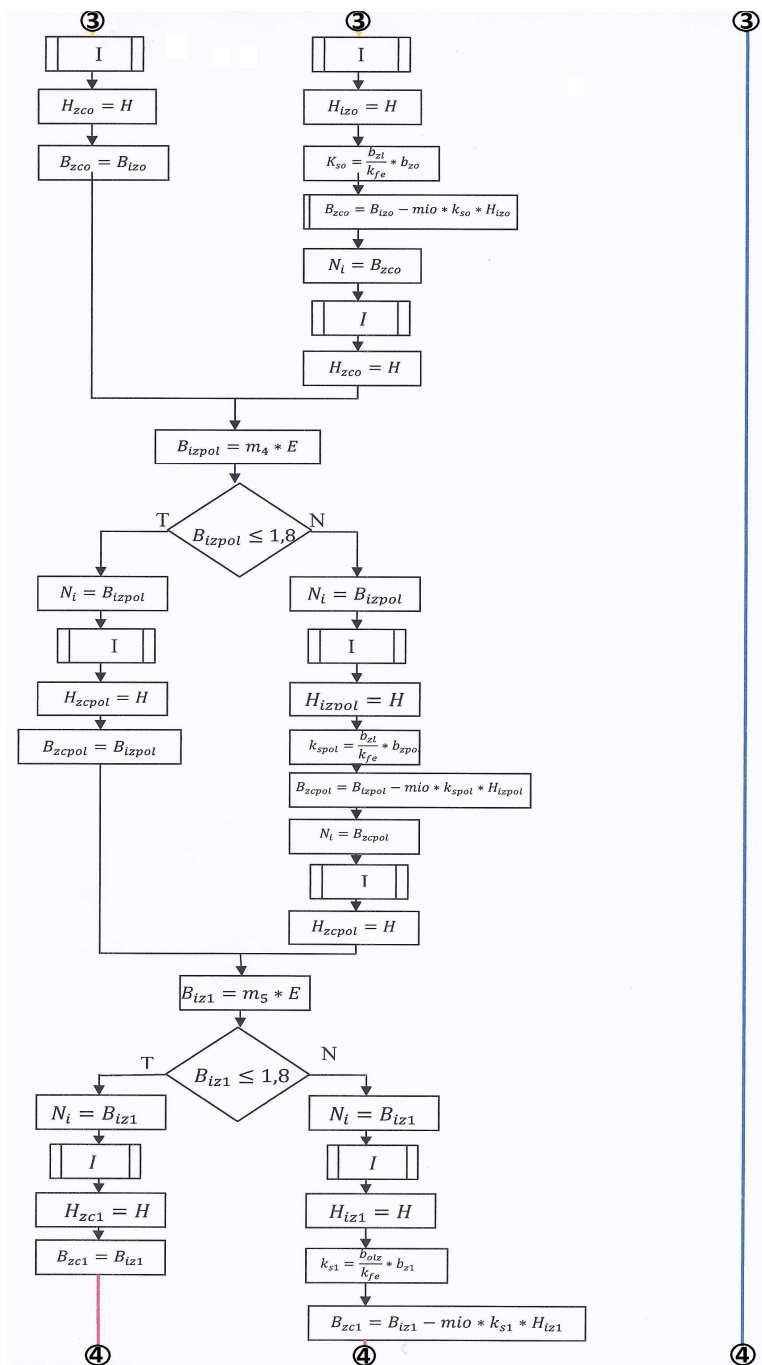
Rys. 4.1. Model analityczny rozrusznika samochodowego



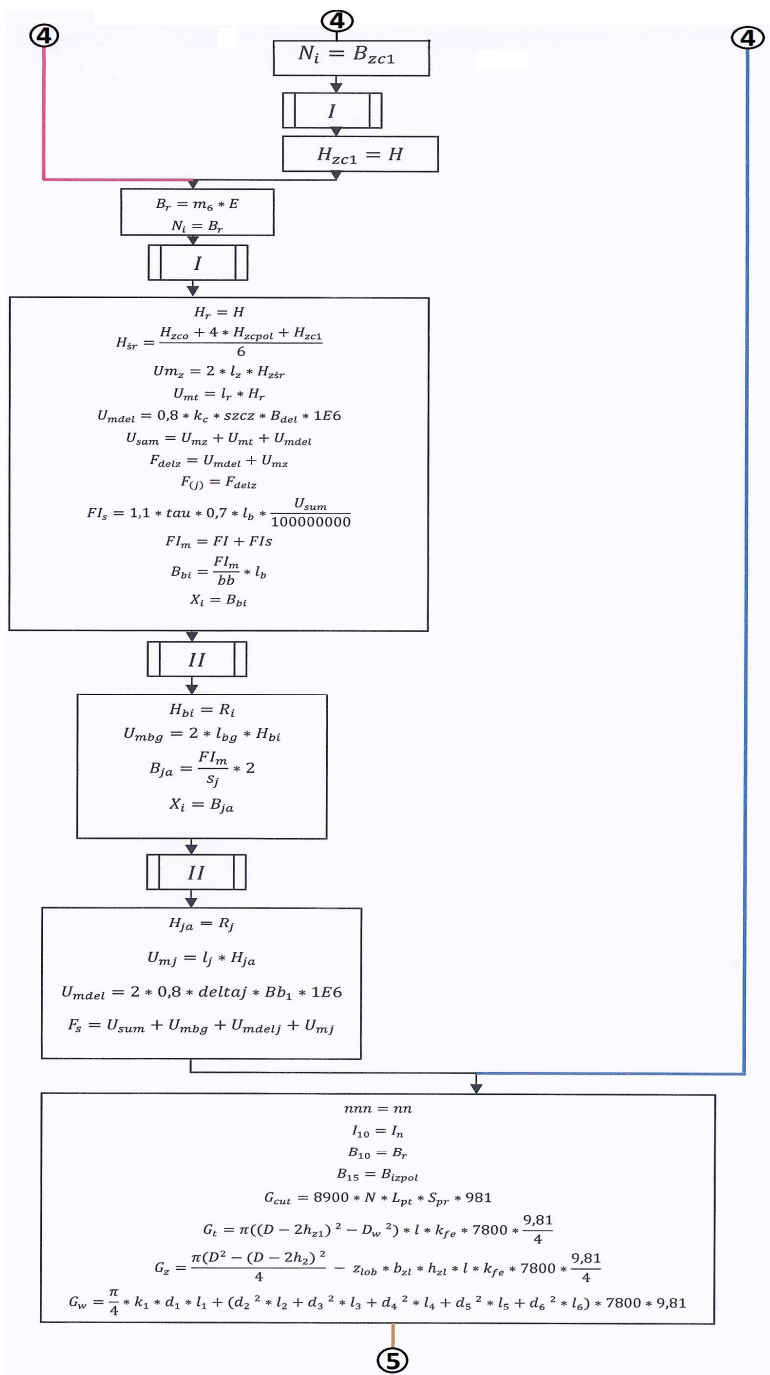
Rys. 4.2. Model analityczny rozrusznika samochodowego



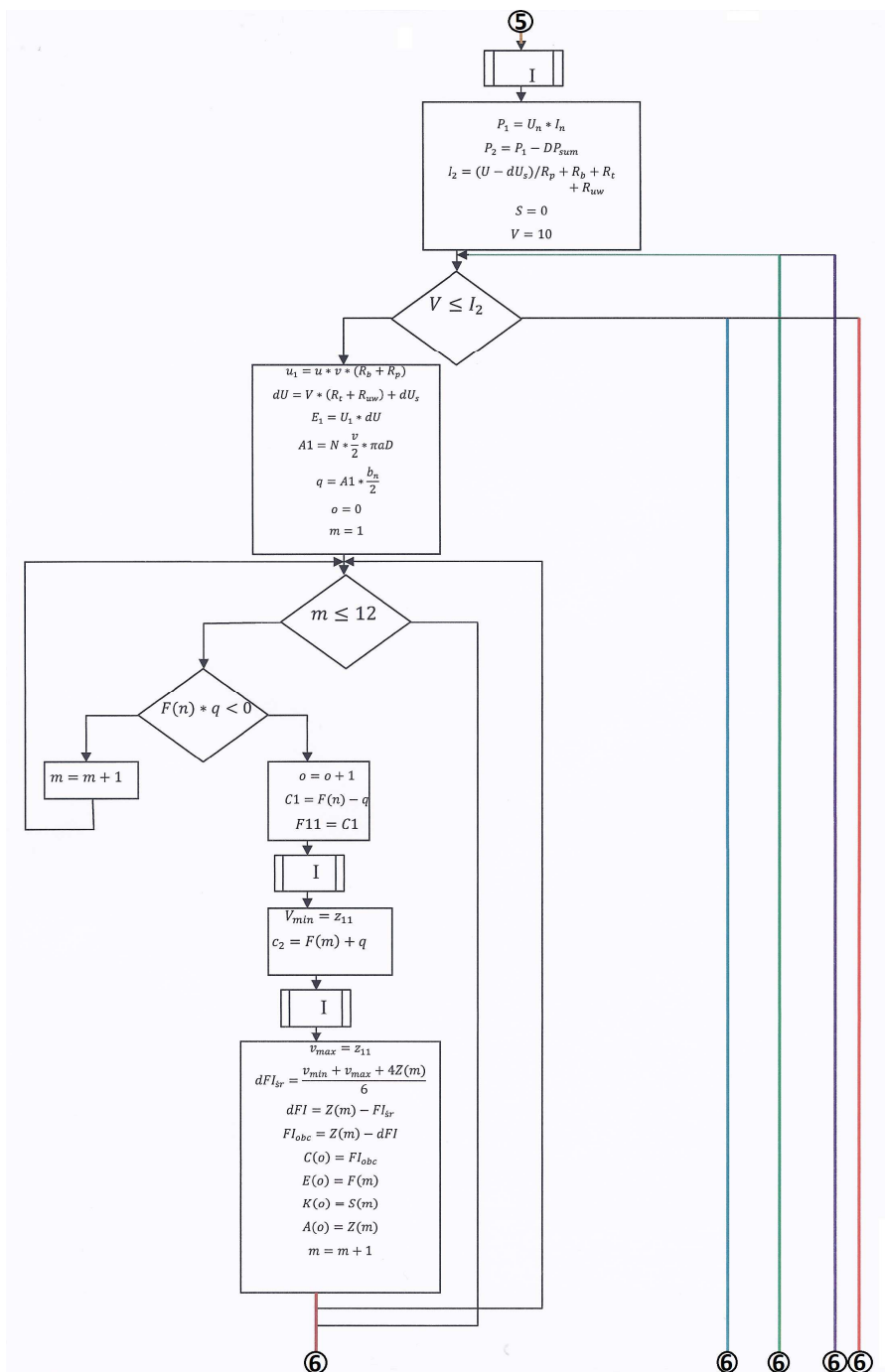
Rys. 4.3. Model analityczny rozrusznika samochodowego



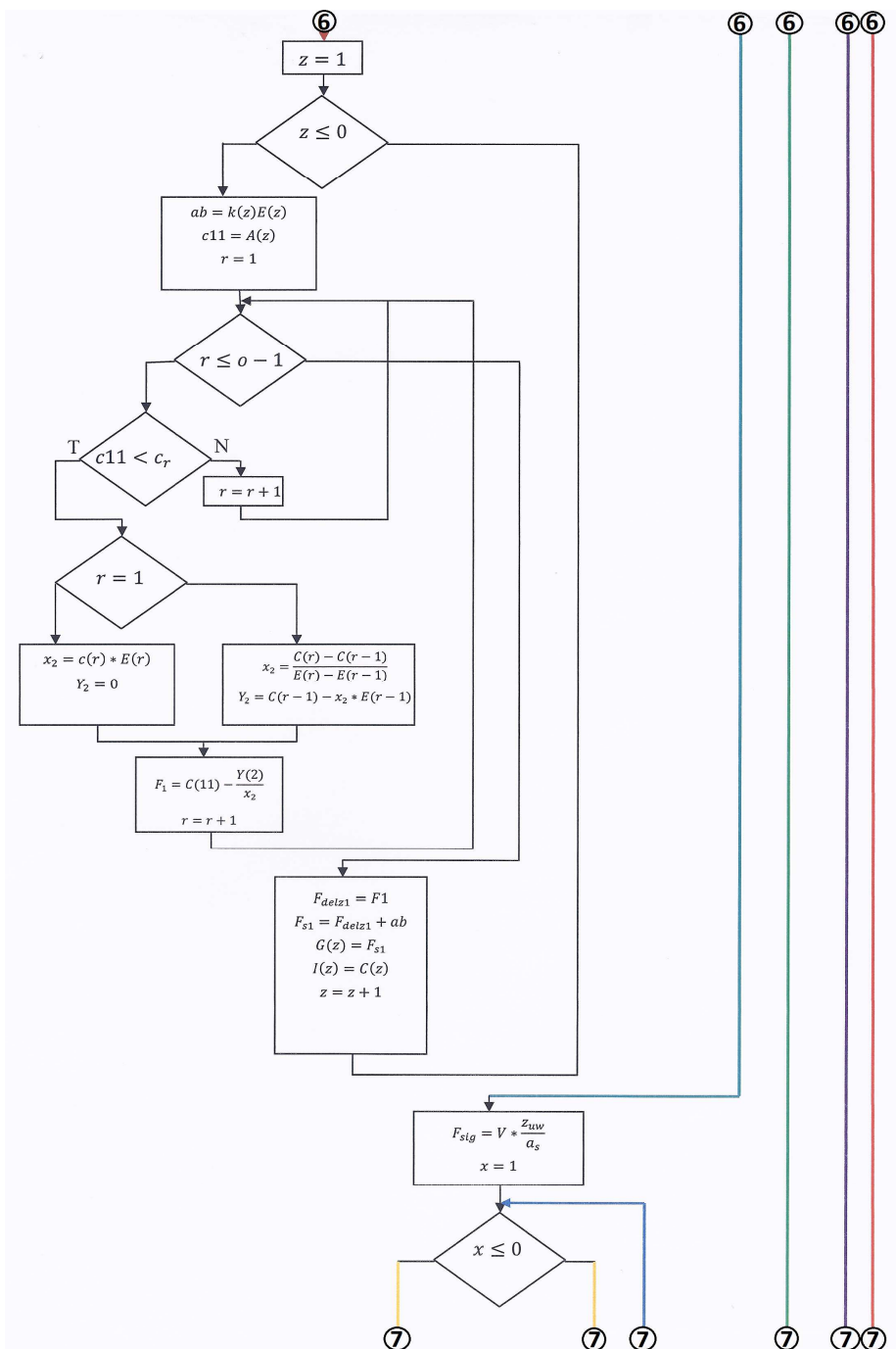
Rys. 4.4. Model analityczny rozrusznika samochodowego



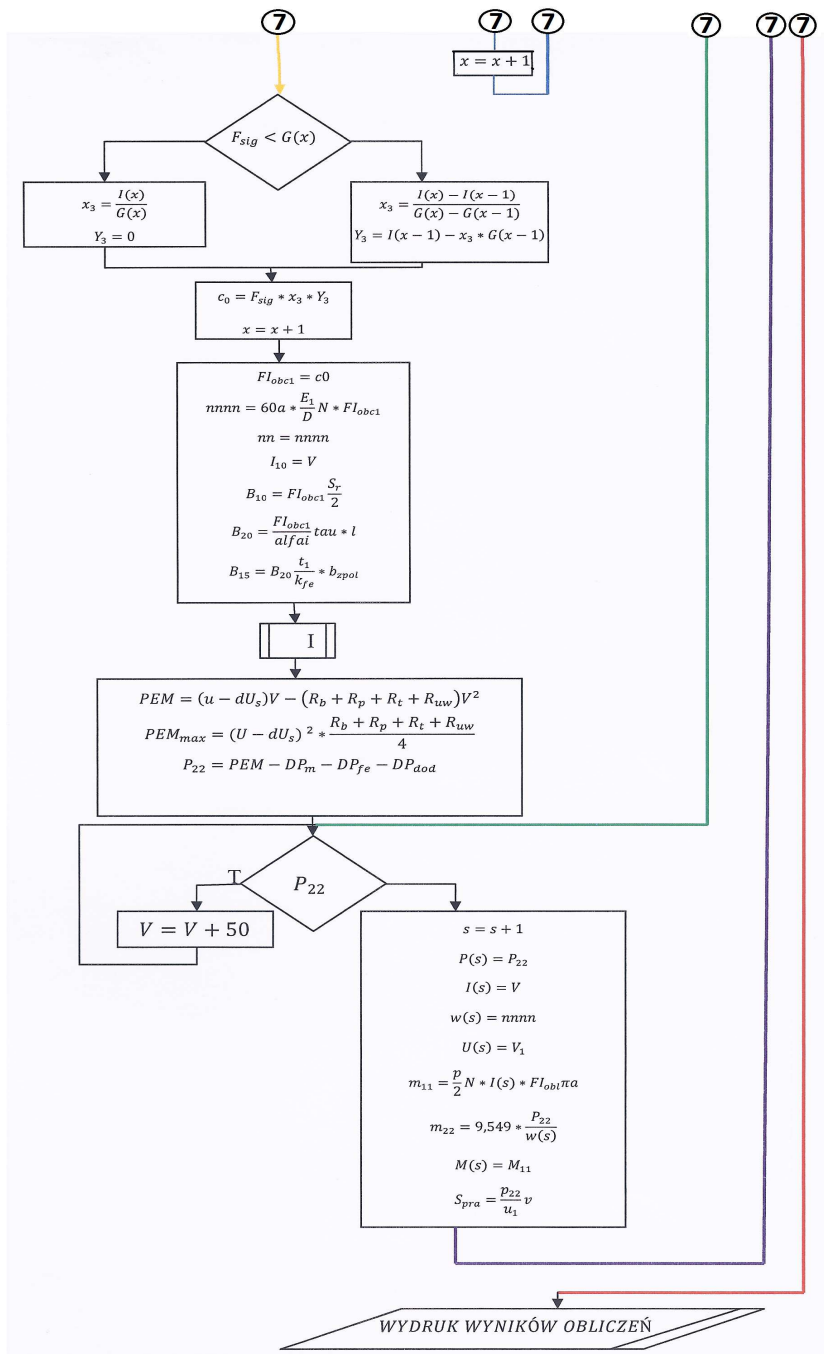
Rys. 4.5. Model analityczny rozrusznika samochodowego



Rys. 4.6. Model analityczny rozrusznika samochodowego



Rys. 4.7. Model analityczny rozrusznika samochodowego



Rys. 4.8. Model analityczny rozrusznika samochodowego

Tab. 4.1. 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 zębra	zuw	liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia na 1 biegun		

Wyniki obliczeń zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 4.1–4.8. przeprowadzono dla trzech typów rozruszników: R5, E100 i R76. Oznaczenia

poszczególnych wielkości z rys. 4.9 zestawiono w tab. 4.1. Przykładową charakterystykę mocy przedstawiono na rys. 4.10 z przebiegu zmian mocy w funkcji prądu można stwierdzić, że odzwierciedla katalogowe dane dla rozrusznika E100 różniące się o 7% (dane katalogowe – 1500 W z modelowania 1400 W).

Charakterystyki rozrusznika

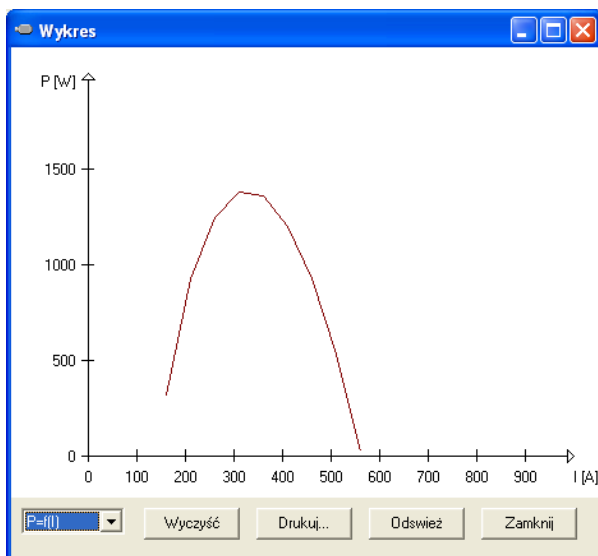
Plik Wykres

Wybór rozrusznika Dane Wyniki obliczeń

Rozrusznik

Pn=	1500 [W]	I=	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]		
Qbat=	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]	deltaj=	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 [-]	hij=	0.007 [m]	hu=	0.0075 [m]	Dl=	0.0165 [m]		
K=	31 [-]	bi=	0.131 [m]	dUs=	0.3 [V]	bPu=	0.0014 [m]		
N=	62 [-]	Dw=	0.0223 [m]	zuw=	10 [-]	dPr=	0.002 [m]		

Rys. 4.9. Zestawienie danych do obliczeń rozrusznika



Rys. 4.10. Charakterystyka mocy rozrusznika E100

4.2. Model charakterystyk mocy rozrusznika w programie Matlab i Matlab Simulink

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

- Charakterystyka $P=f(I)$ dla 3 zmiennych ΔU_{sz} (0,5; 1; 1,5) [V]
 - Charakterystyka $P=f(I)$ dla 3 zmiennych szczelin przytwornikowych $\delta = (0,5; 1; 1,5)$ [mm]
 - Charakterystyka $P=f(I)$ dla 3 zmiennych pojemności baterii Q_b (62, 66, 72) [Ah]
 - Charakterystyka $P=f(I)$ dla 3 zmiennych $R_p = (0,001; 0,002; 0,0028)$ [Ω]
- Dane wejściowe rozrusznika R15 przedstawia tabela 4.2.

Do obliczeń wykorzystano program komputerowy Matlab będący interaktywnym środowiskiem wykorzystywanym do obliczeń oraz tworzenia symulacji komputerowych. Zestawienie wybranych obliczeń zawiera tabela 4.3.

Wyniki obliczeń w programie MATLAB przedstawia tabela 4.4. i 4.5.

W zakresie grafiki program 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 mocy elektrycznej (P) w funkcji prądu (I) rozrusznika R15 przedstawione na rys. 4.11–4.14. przy zmianie następujących parametrów:

- rezystancji przewodów (R_p) [Ω]
- pojemności baterii (Q_b) [Ah]
- szczeliny przytwornikowej (δ) [mm]
- spadku napięcia pod szczotkami (ΔU_{sz}) [V]

Analizując charakterystyki mocy odzwierciedlające zmiany rezystancji przewodów przy wartości 0,001 [Ω] występuje największa wartość prądu zwarcia. Przedstawiony na rys. 4.12 wpływ zmiany pojemności akumulatora na moc rozrusznika powoduje osiągnięcie maksymalnego prądu zwarcia. Symulując zmiany wartości spadku napięcia pod szczotkami (rys. 4.13) można zaobserwować, że przy zwiększaniu spadku napięcia następuje obniżanie mocy rozrusznika. Przy zmniejszaniu szczeliny (rys. 4.14) obserwuje się jej wpływ na zwiększenie mocy rozrusznika.

Zestawienie wyników mocy rozrusznika R15 dla zmiennych: spadku napięcia pod szczotkami (ΔU_{sz}), pojemności baterii (Q_b), szczeliny przytwornikowej oraz rezystancji przewodów (R_p) przedstawiono w tab. 4.6.

Tab. 4.2. Dane wejściowe rozrusznika R15

DANE WEJŚCIOWE ROZRUSZNIKA				Do obliczeń	
Dane wejściowe rozrusznika	Symbol	Wielkość	Jednostka		
moc znamionowa	P _n	1,6	kW	1600	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	27			
liczba czynnych prętów uzwojenia wirnika	N	54			
liczba par gałęzi równoległych	a	1			
średnica pakietu wirnika	D _w	75	mm		
długość pakietu wirnika	l = l _i	63	mm	0,063	m
przekrój przewodu nawojowego uzwojenia wirnika	S _w	10,764	mm ²	0,011	m2
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		62,5	mm		
szerokość		28	mm		
wysokość		11	mm		
grubość wśosów		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	75	mm	0,075	m
współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej	α _i	0,7			
siła elektromotoryczna	E	5,42	V		
napięcie znamionowe na rozruszniku	U _n	7,52	V		
sumaryczny spadek napięcia	ΔU	2,1	V		
prąd znamionowy	I _n	354,57	A	355	A
moc elektryczna	P _w	1922	W		
wartość okładu prądowego wirnika	A	40631	A/m		
przewodność miedzi	γ ₂₀	57	S/m		
gęstość miedzi	δ _{Cu}	8900	kg/m ³	8,9	*10 ⁻³

Tab. 4.3.Cykl obliczeń w programie Matlab

Rezystancja akumulatora w temp. 20°C	
Z.1.	$R_b = \frac{U_{bo}}{17,1 * Q_b}$ U_{bo} – SEM akumulatora Q_b – pojemność akumulatora
Prąd znamionowy pobierany i napięcie na rozruszniku	
Z.2.	$I_n = \frac{P_n}{\eta * U_n}$
Z.3.	$U_n = U_b - R_z * I_n$ P_n – moc znamionowa η – sprawność rozrusznika U_n – napięcie znamionowe na rozruszniku
Napięcie znamionowe na rozruszniku	
Z.4.	$U_n = U_b - R_z * I_n$
Siła elektromotoryczna	
Z.5.	$E = U_n - \Delta U$ ΔU – sumaryczny spadek napięcia
Moc elektryczna	
Z.6.	$P_w = E * I_n$
Wartość okładu prądowego wirnika	
Z.7.	$A = \frac{I_n * N}{2a * \pi * D}$ a – liczba par gałęzi równoległych N – liczba czynnych prętów uzwojenia wirnika D – średnica wirnika [m]

Objętość wirnika			
Z.8.	$B_{\delta} * \alpha_i = \frac{60 P_w}{\pi^2 * A * D^2 * l * n}$ L – długość pakietu wirnika n – prędkość obrotowa rozrusznika przy mocy znamionowej		
Podziałka biegunowa			
Z.9.	$\tau_i = \frac{\pi * D}{2 p}$ p – liczba par biegunów		
Strumień magnetyczny w szczelinie przytwornikowej			
Z.10.	$\phi = B_{\delta} * \tau_1 * \alpha_1 * l$		
Prędkość wirowania wirnika – sprawdzenie			
Z.11.	$n = \frac{60 * E * a}{p * N * \phi}$		
UZWOJENIE WIRNIKA			
Z.12.	$N = \frac{60 * a * E}{p * n * \phi}$		
Dane uzwojeń wirnika			
Dane	Symbol	Wartość	Jednostka
zwojność zwoju	z	1	
liczba działek komutatora	K	27	
liczba zębów	Ż	27	
poskok zębkowy		1–8	
przekrój przewodu nawojowego uzwojenia wirnika	S _w	10,764	mm ²
poskok komutatorowy			

Rezystancja uzwojenia twornika w temp +20°C	
Z.13.	$R_{t20} = \frac{N * l_N}{\gamma_{20} * Spr * (2a)^2}$
Masa miedzi uzwojenia twornika	
Z.14.	$m_{cut} = \delta_{cu} * N * l_N * Spr$ δ_{Cu} – gęstość masowa miedzi
OBWÓD MAGNETYCZNY	
Szczelina przytwornikowa	
Z.15.	$\delta = / 0,4 \div 0,25 / * \frac{b_n * A}{B_\delta} * 10^{-6}$ b_n – szerokość łuku nabiegunnika
Przekrój rdzenia wirnika	
Z.16.	$S_t = h_t * l_i * k_{Fe}$ h_t – wysokość żłobka
Strumień przenikający przez biegun	
Z.17.	$\phi_b = \sigma * \Phi$
CHARAKTERYSTYKA MAGNESOWANIA	
Indukcja w poszczególnych przekrojach zęba	
głowy	
Z.18.	$B'_{z1} = \frac{B_\delta * \tau_{z1}}{k_{Fe} * b_{z1}}$ τ_{z1} – podziałka żłobka na powierzchni wirnika b_{z1} – szerokość zęba
w połowie wysokości	
Z.19.	$B'_{z2} = \frac{B_\delta * \tau_{z1}}{k_{Fe} * b_{z2}}$ b_{z2} – szerokość zęba w połowie wysokości

w stopie	
Z.20.	$B'_{z3} = \frac{B_{\delta} * \tau_{z1}}{k_{Fe} * b_{z3}}$ b_{z3} – szerokość zęba w stopie zęba
Rzeczywiste indukcje w zębie	
Z.21.	$K_{s3} = 4\Pi * 10^{-7} * \frac{b_z + b_{z3} * (1 - k_{Fe})}{b_{z3} * k_{Fe}}$
Z.22.	$K_{s2} = 4\Pi * 10^{-7} * \frac{b_z + b_{z2} * (1 - k_{Fe})}{b_{z2} * k_{Fe}}$
Z.23.	$K_{s1} = 4\Pi * 10^{-7} * \frac{b_z + b_{z1} * (1 - k_{Fe})}{b_{z1} * k_{Fe}}$
Średnia wartość natężenia pola magnetycznego w zębie	
Z.24.	$H_{zsr} = \frac{H_{z1} + 4 * H_{z2} + H_{z3}}{6}$
Napięcie magnetyczne na zębach	
Z.25.	$2U_{mz} = 2h_z * H_{zsr}$
Średnia długość linii pola magnetycznego w rdzeniu twornika	
Z.26.	$Lt = \frac{\pi}{2p} * (D_w + h_t)$
Indukcja magnetyczna w rdzeniu twornika	
Z.27.	$B_t = \frac{\phi}{2 * S_t}$

Napięcie magnetyczne w szczelinach przytwornikowych	
Z.28.	$2U_{m\delta} = 1,6 * K_c * \delta * B\delta$
Napięcie magnetyczne na biegunach	
Z.29.	$2U_{mb} = 2 * (h_b + h_n) * H_b$
Indukcja w jarzmie	
Z.30.	$B_j = \frac{\sigma * \phi}{2H_j * l_j}$
Długość średniej linii pola magnetycznego w jarzmie	
Z.31.	$L_j = \frac{\pi * (D_{jz} - b_j)}{2p}$
Napięcie magnetyczne w jarzmie	
Z.32.	$U_{mj} = L_j * H_j$
Napięcie magnetyczne na szczelinach przyjarmowych	
Z.33.	$2U_{m\delta j} = \frac{B_b * 2\delta_j}{\mu o}$
Suma spadków napięć na parę biegunów	
Z.34.	$2F_m = 2U_{m\delta} + 2U_{mz} + U_{mt} + 2U_{mb} + 2U_{m\delta j} + U_{mj}$
UZWOJENIE WZBUDZENIA	
Wymagany przepływ uzwojenia wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym	
Z.35.	$F_w = F_o + F_q$

Całkowita długość przewodu cewki uzwojenia wzbudzenia	
Z.36.	$L_s = z_s * l_{sr}$
Rezystancja cewki uzwojenia wzbudzenia	
Z.37.	$R_{s20} = \frac{L_s}{\gamma_{20} * S_s}$
Rezystancja cewki wzbudzenia w stanie nagrzanym	
Z.38.	$R_{s115} = k_v * R_{s20}$
Masa miedzi cewek wzbudzenia	
Z.39.	$m_{cus} = \delta_{cu} * L_s * 2 * p * S_s$
DOBÓR SZCZOTEK i KOMUTATORA	
Prędkość komutatora	
Z.40.	$V_K = \frac{\pi * D_K * n}{60}$
Gęstość prądu pod szczotką	
Z.41.	$J_{sz} = \frac{I_n}{p * b_{sz} * l_{sz}}$
Szerokość strefy komutacji	
Z.42.	$b_{sK} = b_{sz} * \frac{D}{D_k} + (u - \frac{a}{p} + \varepsilon) * \tau_K'$
Z.43.	$\tau_K' = \tau_K * \frac{D}{D_K}$
Siła elektromotoryczna w zezwoju	
Z.44.	$e_r = 2 * z * l_i * A * V_D * \xi$
Z.45.	$V_D = \frac{\pi * D * n}{60}$

Siła elektromotoryczna rotacji	
Z.46.	$e_t = 2 * z * l_i * B_q * V_D$
Suma sił elektromotorycznych w zezwoju	
Z.47.	$e = e_r + e_t$
STRATY MOCY	
Straty mechaniczne	
Straty tarcia szczotek o komutator	
Z.48.	$\Delta P_{msz} = \mu_t * P_s \Sigma S_{sz} * V_K * 10^4$
Z.49.	$\Sigma S_{sz} = 4 * b_{sz} * l_{sz} * 10^{-4} m^2$
Straty elektryczne	
Straty w uzwojeniu twornika	
Z.51.	$\Delta P_{Cut} = I_n^2 * R_{t115^o}$
Straty w uzwojeniu wzbudzenia	
Z.52.	$\Delta P_{CuS} = I_n^2 * R_{s115^o}$
Straty w zestykach ślizgowych	
Z.53.	$\Delta P_{sz} = \Delta U_{sz} * I_n$
Objętość rdzenia twornika	
Z.54.	$V_t = \frac{\pi * [(D - 2h_z)^2 - D_w^2] * k_{Fe} * l_i}{4}$
Masa rdzenia twornika	
Z.55.	$m_t = V_t * \delta_{Fe}$

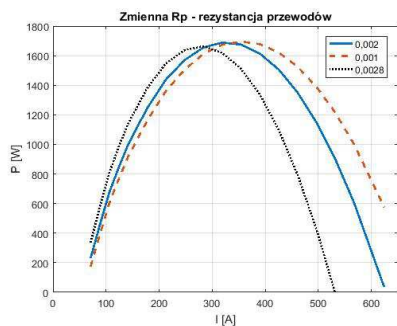
Objętość zębów twornika	
Z.56.	$S_{\dot{z}} = (h_z - b_z) * b_z + \pi * r_{\dot{z}}^2$
Masa zębów twornika	
Z.57.	$m_z = V_z * \delta_{Fe}$
Straty w żelazie	
Z.58.	$f = \frac{p * n}{60}$
Z.59.	$\Delta P_{Fe} = C * P_o * \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} * \left(\frac{B_t}{1,3}\right)^2 * m_t + \left(\frac{B_z}{1,3}\right)^2 * m_z$
Suma strat mechanicznych	
$\Delta P_m = \Delta P_\tau + \Delta P_{msz}$	

Tab. 4.4. Wyniki obliczeń w programie Matlab

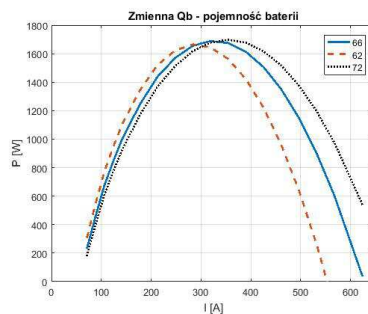
Lp.	Symbol	0,5 ϕ	0,8 ϕ	1 ϕ	1,15 ϕ	1,3 ϕ	1,5 ϕ
1	$\phi \cdot 10^{-3} [\text{Wb}]$	0,563	0,902	1,127	1,296	1,465	1,690
2	B δ [T]	0,349	0,559	0,620	0,803	0,908	1,048
3	2Um δ [A]	378,1	604,9	756,1	869,5	982,9	1134,2
4	B'z1=Bz1 [T]	0,53	0,85	1,06	1,22	1,38	1,59
5	B'z2=Bz2 [T]	0,90	1,44	1,80	2,07	2,34	2,70
6	B'z3 [T]	1,19	1,90	2,38	2,74	3,09	3,57
7	Bz3 [T]	1,17	1,87	2,34	2,69	3,04	3,51
8	Bz $\acute{r}$ [T]	0,49	0,78	0,97	1,12	1,27	1,46
9	H δ 1 [A/m]	272	445	637	892	1340	3420
10	H δ 2 [A/m]	480	1600	11500	30000	30000	30000
11	H δ 3[A/m]	826	24000	30000	30000	30000	30000
12	H $\acute{r}$ [A/m]	503	5141	12773	25149	25223	25570
13	2Um δ z [A]	11,97	122,35	303,99	598,54	600,32	608,57
14	B δ [T]	0,29	0,46	0,58	0,66	0,75	0,86
15	H δ [A/m]	170,50	244,00	292,00	333,00	382,50	452,00
16	U δ [A]	4,7	6,7	8,1	9,2	10,6	12,5
17	B δ [T]	0,73	1,17	1,46	1,68	1,89	2,19
18	H δ [A/m]	372	797	1750	6000	16900	30000
19	2Um δ [A]	8,2	17,5	38,5	132,0	371,8	660,0
20	2Um δ j [A]	46,4	74,2	92,8	106,7	120,6	139,2
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 δ j [A]	29,0	66,0	113,5	283,4	952,9	2485,8
24	2F δ [V]	478,3	891,7	1313,0	1999,3	3039,1	5040,2
25	2F δ [V]	502	936	1379	2099	3191	5292
26	U δ p	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
27	F δ [V]	251,1	468,2	689,3	1049,7	1595,5	2646,1

Tab. 4.5. Wyniki obliczeń w programie Matlab

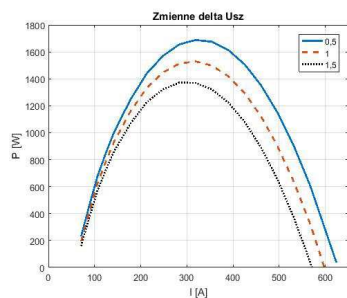
WIELKOŚĆ i WYMIAR	0,2 In	0,3 In	0,4 In	0,6 In	0,8 In	1,0 In	1,2 In	1,4 In	1,6 In	I zw
1 I [A]	71	106,5	142	213	284	355,00	426	497	568	624,8
2 Un [V]	11,103	10,655	10,206	9,309	8,412	7,521	6,618	5,722	4,825	4,107
3 DwItaU[V]	0,407	0,611	0,814	1,221	1,628	2,035	2,442	2,849	3,256	3,582
4 E [V]	10,696	10,044	9,392	8,088	6,784	5,486	4,176	2,872	1,568	0,525
5 F = 2,5 In	177,5	266,25	355	532,5	710	887,5	1065	1242,5	1420	1562
6 $\phi \cdot 10^{-3}$ [Wb]	0,287	0,419	0,539	0,769	0,973	1,127	1,296	1,493	1,924	2,043
7 n[obr/min]	14491	9332	6781	4090	2712	1893	1253	748	317	100
8 B δ	0,16	0,23	0,30	0,42	0,53	0,62	0,71	0,82	1,06	1,12
9 B $\delta + \alpha i$	0,1105	0,1611	0,2074	0,2960	0,3745	0,4338	0,4990	0,5749	0,7407	0,7863
10 Bzsr[T]	0,2480	0,3617	0,4654	0,6645	0,8406	0,9738	1,1200	1,2904	1,6626	1,7650
11 Bt	0,1466	0,2137	0,2750	0,3927	0,4967	0,5754	0,6618	0,7625	0,9824	1,0429
12 f [Hz]	483,03	311,07	226,03	136,33	90,40	63,10	41,77	24,93	10,57	3,33
13 ΔP_{Fe} [W]	27,1	32,6	35,6	37,6	35,3	29,7	22,9	15,6	8,5	2,1
14 ΔP_m [W]	450,12	289,87	210,63	127,04	84,24	58,80	38,92	23,23	9,85	3,11
15 ΔP_{cut} [W]	20,3	45,7	81,3	182,8	325,0	507,9	731,3	995,4	1300,1	1573,2
16 ΔP_{cus} [W]	8,6	19,3	34,3	77,3	137,4	214,6	309,1	420,7	549,4	664,8
17 ΔP_{sz} [W]	35,5	53,25	71	106,5	142	177,5	213	248,5	284	312,4
18 ΔP_d [W]	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
19 ΔP [W]	557,6	456,7	448,8	547,2	739,9	1004,4	1331,2	1719,4	2167,9	2571,6
20 P1 [W]	788,32	1134,72	1449,28	1982,87	2389,10	2669,90	2819,48	2843,62	2740,41	2566,13
21 P [W]	230,7	678,0	1000,5	1435,6	1649,2	1665,5	1488,2	1124,2	572,5	0,0
22 M [Nm]	0,159	0,727	1,475	3,510	6,081	8,798	11,877	15,030	18,061	0,000
23 A [A/m]	8136,00	12204,00	16272,00	24408,00	32544,00	40680,00	48816,00	56952,00	65088,01	71596,81
24 0,5*bn*A[A/mm]	166,79	250,18	333,58	500,36	667,15	833,94	1000,73	1167,52	1334,30	1467,73
25 A [A/cm]	81,36	122,04	162,72	244,08	325,44	406,80	488,16	569,52	650,88	715,97
26 Pw [W]	759,42	1069,69	1333,68	1722,78	1926,71	1947,41	1779,10	1427,56	890,85	328,17
27 ΔP_{Ti} [W]	108,68	69,99	50,8575	30,675	20,34	14,1975	9,3975	5,61	2,3775	0,75
28 ΔP_{msz} [W]	341,44	219,88	159,77	96,37	63,90	44,60	29,52	17,62	7,47	2,36
29 VK [m/s]	34,1	22,0	16,0	9,6	6,4	4,5	3,0	1,8	0,7	0,2



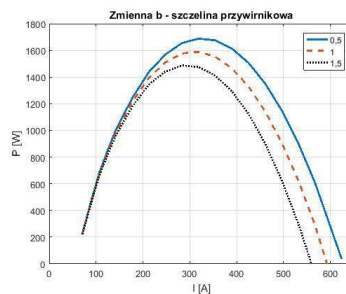
Rys.4.11. Wpływ zmiany rezystancji przewodów na moc rozrusznika R15



Rys.4.12. Wpływ zmiany pojemności akumulatora na moc rozrusznika R15



Rys. 4.13. Wpływ zmiany spadku napięcia pod szczotkami na moc rozrusznika R15

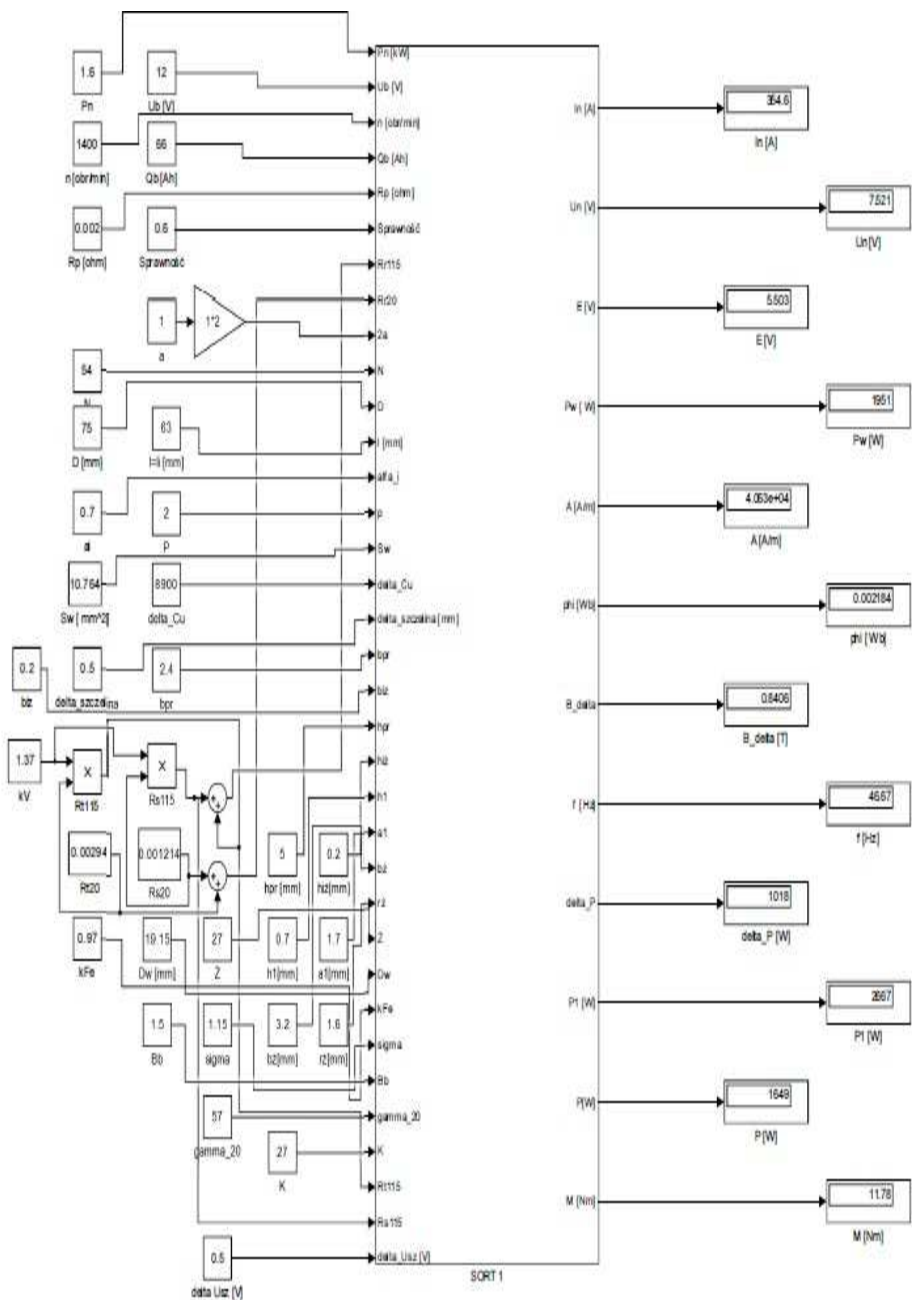


Rys. 4.14. Wpływ zmiany szczeliny powietrznej na moc rozrusznika R15

Tab.4.6. Zestawienie wyników mocy rozrusznika R15 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]		
R15	0,5	1	1,5	62	66	72	0,5	1	1,5	0,001	0,002	0,0028
P_{el} [W]	1700	1570	1390	1660	1680	1700	1700	1600	1500	1700	1680	1660

Symulację rodzaju uszkodzenia dla zmiennej pojemności akumulatora (Q_b) oraz dla zmiennej rezystancji przewodów (R_p) przedstawiono na rys. 4.15, a wyniki symulacji w tab. 4.7.



Rys. 4.15. Schemat blokowy programu Simulink do modelowania parametrów rozrusznika wraz wynikami dla wpisanych danych

Tab.4.7. Wyniki symulacji w programie Matlab Simulink dla rozrusznika R15

	Q_b [Ah]			R_p [Ω]		
R15	62	66	72	0,001	0,002	0,0028
I_n [A]	398,3	354,6	326,7	324	354,6	415,1
U_n [V]	6,69	7,52	8,16	8,23	7,52	6,42
B [T]	0,67	0,84	0,96	0,97	0,84	0,62
M [Nm]	8,91	10,51	11,43	11,52	10,51	8,25
P_{el} [W]	1764	1951	2059	2069	1951	1686
P_{mech} [W]	1249	1471	1600	1612	1471	1156

4.3. Model charakterystyk rozrusznika w programie LabView

Używając środowiska programistycznego LabView [143] 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 elektrycznego (M_e);
- Momentu mechanicznego (M_m).

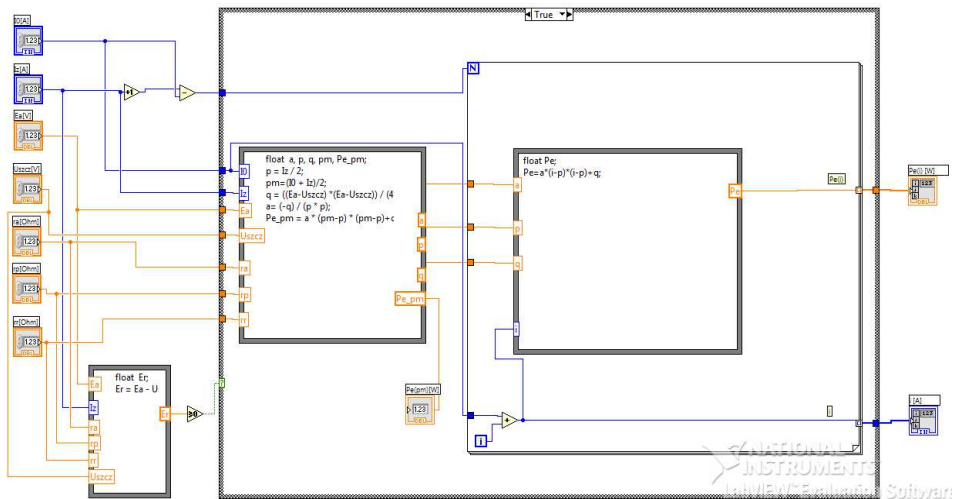
Przy symulacji charakterystyki mocy elektrycznej należy wprowadzić następujące dane techniczne rozrusznika:

- I₀ = 60 [A] – prąd początkowy;
- I_z = 600 [A] – prąd zwarcia;
- U_{szcz} = 0,5 [V] – spadek napięcia pod szczotkami;
- R_R = 0,005 [Ω] – rezystancja uzwojenia twornika i wzbudzenia rozrusznika
- E_A = 13 [V] – siła elektromotoryczna akumulatora;
- R_A = 0,005 [Ω] – rezystancja akumulatora;
- R_p = 0,005 [Ω] – rezystancja przewodów łączących rozrusznik z akumulatorem;

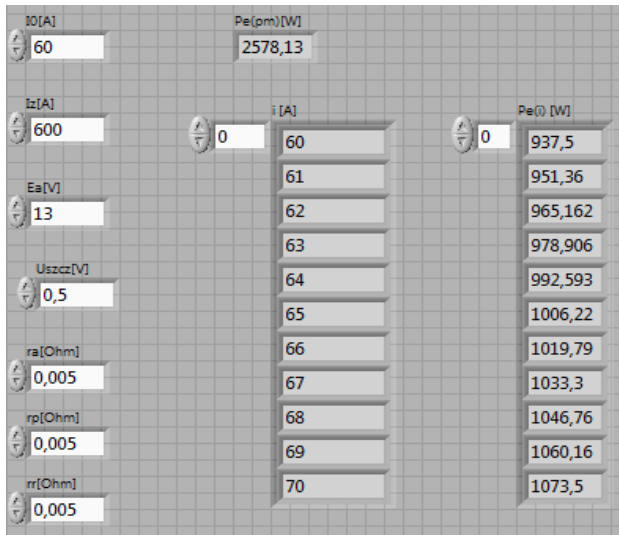
Program umożliwia wyznaczenie charakterystyk mocy elektrycznej, mocy mechanicznej, momentu, napięcia, prądu pobieranego przez rozrusznik.

Na rysunku 4.16 przedstawiono blokowy schemat połączeń do wyznaczenia charakterystyki mocy elektrycznej rozrusznika. Schemat obliczeń utworzono w pętli Case, w przypadku, gdy do pola selektora dołączone jest wyrażenie lo-

giczne istnieją dwie wartości True i False. Panel frontowy zadanych wielkości przedstawia rys. 4.17.

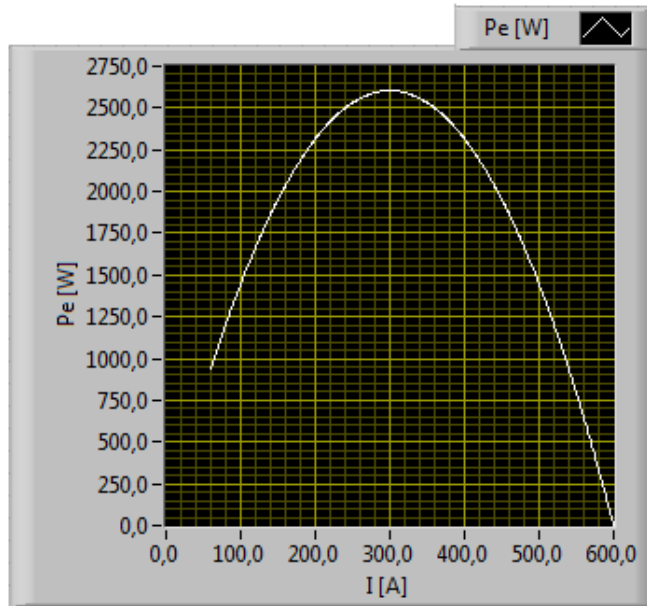


Rys. 4.16. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki mocy elektrycznej



Rys. 4.17. Panel frontowy zadanych wartości

Rysunek 4.18 przedstawia charakterystykę mocy elektrycznej w funkcji prądu obliczoną w programie.

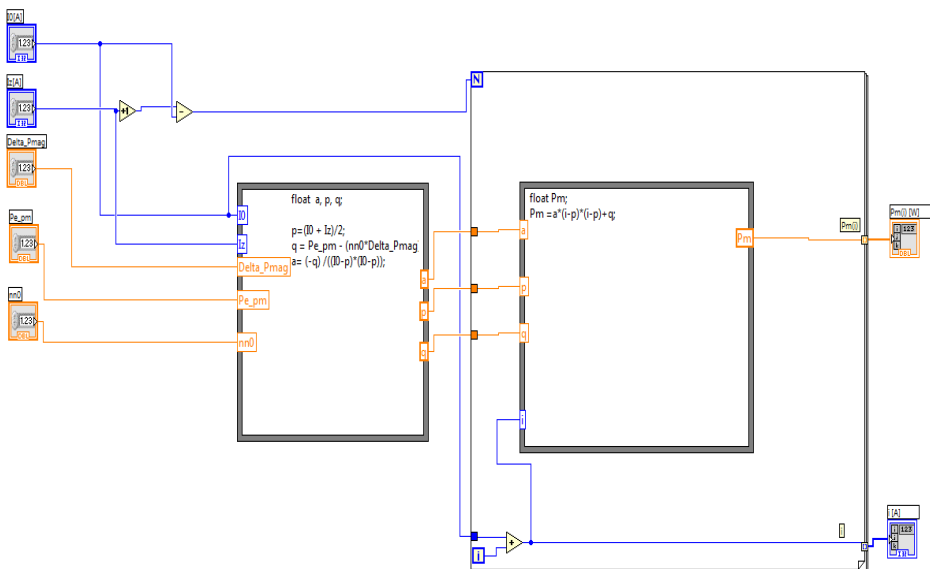


Rys. 4.18. Charakterystyka mocy elektrycznej w funkcji prądu

Przy symulacji mocy mechanicznej jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane rozrusznika:

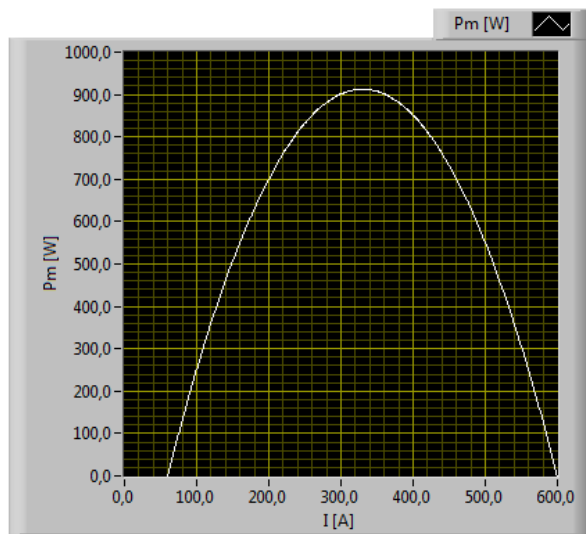
- $I_0 = 60$ [A] – prąd początkowy;
- $I_z = 600$ [A] – prąd zwarcia;
- $\Delta P_{\text{mag}} = 100$ [W] – różnicę między mocą mechaniczną a elektryczną;
- $P_e - p_m = 937,5$ [W] – wartość maksymalna mocy mechanicznej;
- $nn_0 = 0,25$ – współczynnik korelacji.

Rysunek 4.19. przedstawia blokowy schemat połączeń do wyznaczenia charakterystyki mocy mechanicznej rozrusznika.



Rys. 4.19. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki mocy mechanicznej

Rysunek 4.20 przedstawia charakterystykę mocy mechanicznej w funkcji prądu obliczoną w programie.

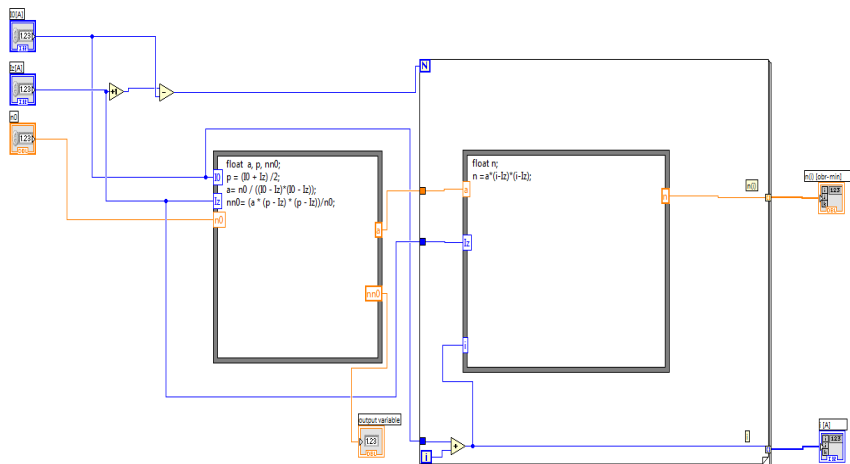


Rys. 4.20. Charakterystyka mocy mechanicznej w funkcji prądu

Przy symulacji prędkości obrotowej jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane rozrusznika:

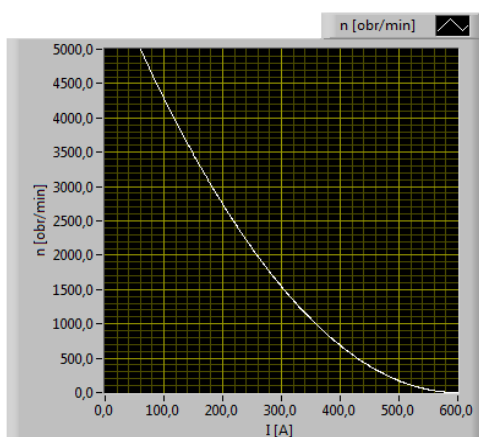
- $I_0 = 60$ [A] – prąd początkowy;
- $I_z = 600$ [A] – prąd zwarcia;
- $n_0 = 5000$ [obr/min] – prędkość obrotowa biegu jałowego.

Rysunek 4.21 przedstawia blokowy schemat połączeń do wyznaczania charakterystyki prędkości obrotowej rozrusznika.



Rys. 4.21. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki prędkości obrotowej

Rysunek 4.22 przedstawia charakterystykę prędkości obrotowej w funkcji prądu obliczoną w programie.

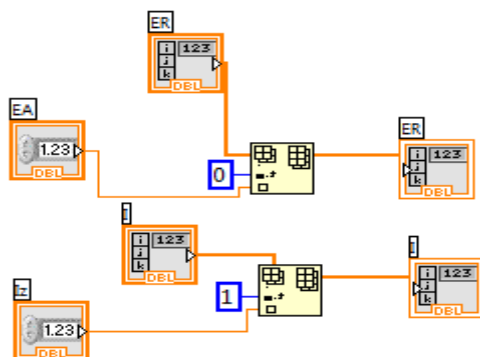


Rys. 4.22. Charakterystyka prędkości obrotowej w funkcji prądu

Przy symulacji spadku napięcia akumulatora jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane:

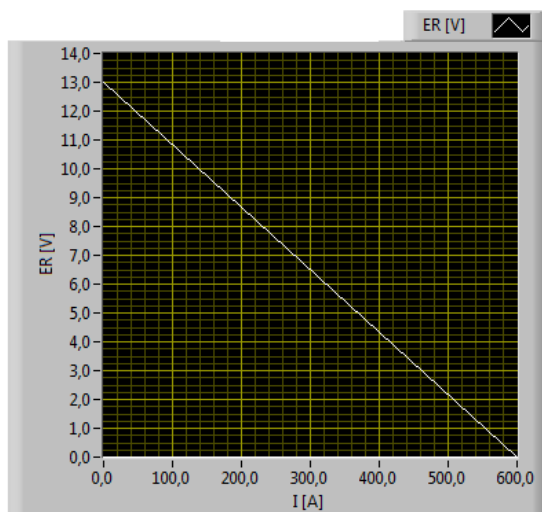
- $E_A = 13 \text{ [V]}$ – siła elektromotoryczna akumulatora,
- $I_z = 600 \text{ [A]}$ – prąd zwarcia rozrusznika.

Rysunek 4.23 przedstawia blokowy schemat połączeń do wyznaczenia charakterystyki siły elektromotorycznej akumulatora.



Rys. 4.23. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki siły przeciwelektromotorycznej akumulatora

Rysunek 4.24 przedstawia charakterystykę SEM akumulatora w funkcji prądu obliczoną w programie.

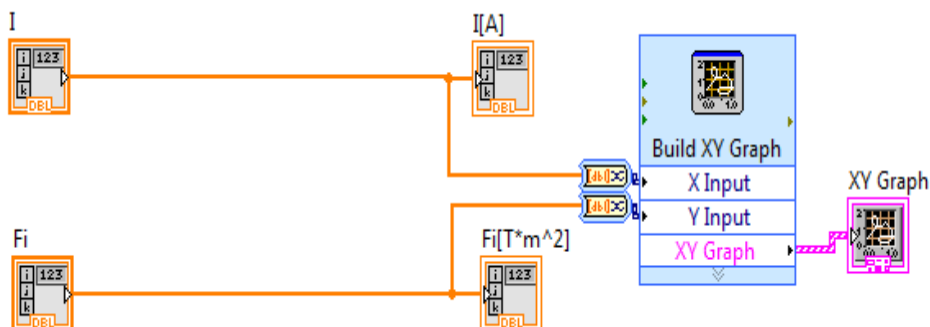


Rys. 4.24. Charakterystyka siły elektromotorycznej akumulatora w funkcji prądu

Przy symulacji strumienia magnetycznego rozrusznika jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane:

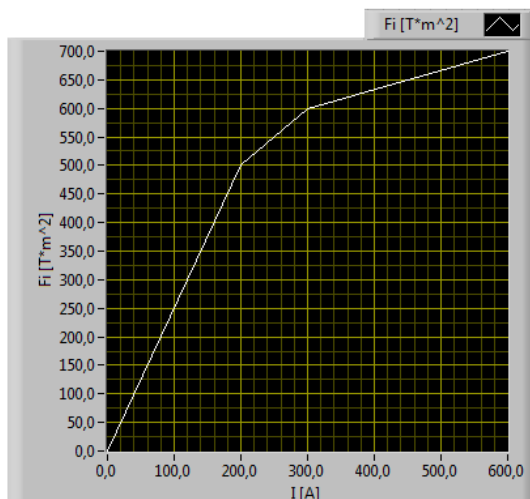
- $\Phi = 0, 500, 600, 700 \text{ [T}\cdot\text{m}^2]$ – wartość strumienia magnetycznego;
- $I = 0, 200, 500, 600 \text{ [A]}$ – natężenie prądu.

Na rysunku 4.25 przedstawiono blokowy schemat połączeń do wyznaczania charakterystyki strumienia magnetycznego rozrusznika.



Rys. 4.25. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki strumienia magnetycznego

Rysunek 4.26 przedstawia charakterystykę strumienia magnetycznego rozrusznika w funkcji prądu obliczoną w programie.

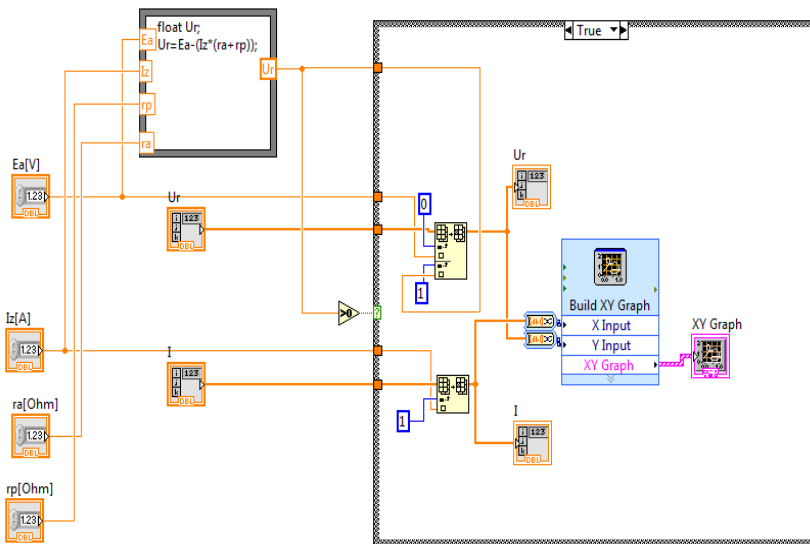


Rys. 4.26. Charakterystyka strumienia magnetycznego w funkcji prądu

Przy symulacji charakterystyki napięcia rozrusznika jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane:

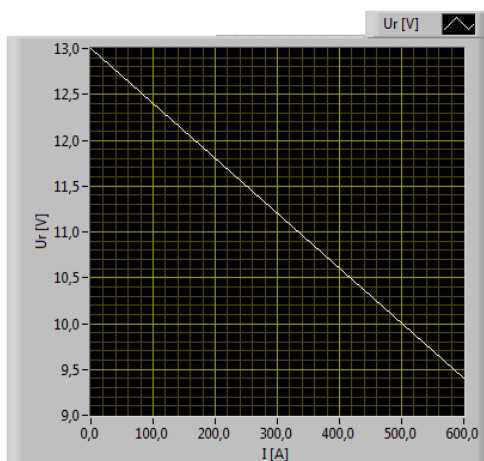
- $I_z = 600$ [A] – prąd zwarcia rozrusznika;
- $E_A = 13$ [V] – siła elektromotoryczna akumulatora;
- $R_A = 0,005$ [Ω] – rezystancja akumulatora;
- $R_p = 0,001$ [Ω] – rezystancja przewodów łączących rozrusznik z akumulatorem;
- $U_R = 13; 0$ [V] – napięcie rozrusznika.
- $I = 0; 600$ [A] – natężenie prądu

Na rysunku 4.27 przedstawiono blokowy schemat połączeń do wyznaczenia charakterystyki napięcia rozrusznika. Schemat obliczeń utworzono w pętli Case, w przypadku, gdy do pola selektora dołączone jest wyrażenie logiczne istnieją dwie wartości True i False.



Rys. 4.27. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki napięcia rozrusznika

Rysunek 4.28 przedstawia charakterystykę napięcia rozrusznika w funkcji prądu obliczoną w programie.

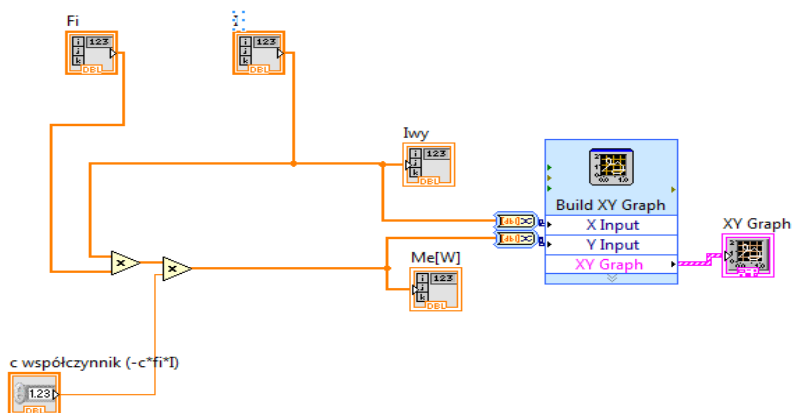


Rys. 4.28. Charakterystyka napięcia rozrusznika w funkcji prądu

Przy symulacji momentu elektromagnetycznego rozrusznika jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane:

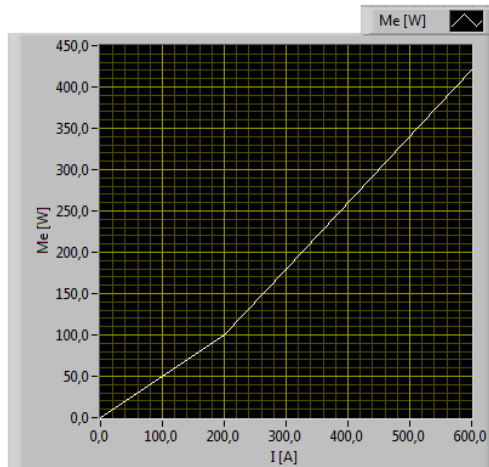
- $\Phi = 0, 500, 600, 700$ [T·m²] – wartość strumienia magnetycznego;
- $I = 0, 200, 500, 600$ [A] – natężenie prądu;
- $c = 0,001$ – współczynnik korekcji.

Na rys. 4.29 przedstawiono blokowy schemat połączeń do wyznaczania charakterystyki momentu elektromagnetycznego rozrusznika.



Rys. 4.29. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki momentu elektromagnetycznego rozrusznika

Na rys. 4.30. przedstawiono charakterystykę napięcia rozrusznika w funkcji prądu obliczoną w programie.

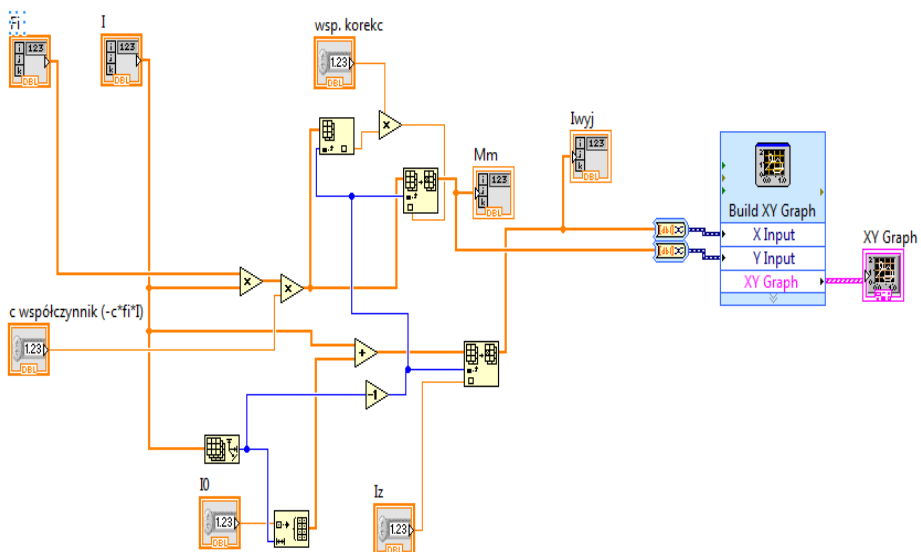


Rys. 4.30. Charakterystyka momentu elektromagnetycznego w funkcji prądu

Przy symulacji momentu mechanicznego rozrusznika jako parametry wejściowe przyjęto następujące dane:

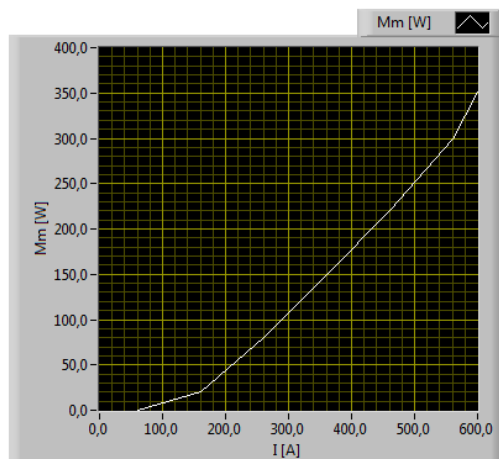
- $I_0 = 60$ [A] – prąd początkowy;
- $I_z = 600$ [A] – prąd zwarcia;
- $\Phi = 0; 200; 400; 500; 550; 600; 650$ [$T \cdot m^2$] – wartość strumienia magnetycznego;
- $I = 0; 100; 200; 300; 400; 500; 600$ [A] – natężenie prądu;
- $c = 0,001$ – współczynnik ($-c \cdot \Phi \cdot I$);
- $0,9$ – współczynnik korekcji.

Na rys. 4.31. przedstawiono blokowy schemat połączeń do wyznaczenia charakterystyki momentu mechanicznego rozrusznika.



Rys. 4.31. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyki momentu mechanicznego rozrusznika

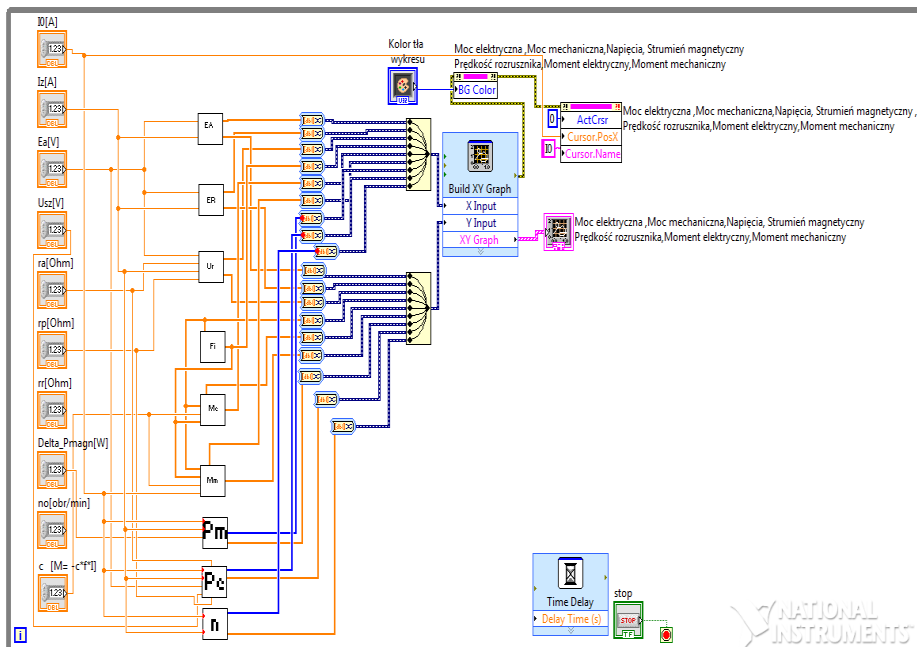
Na rys. 4.32 przedstawiono charakterystykę momentu mechanicznego rozrusznika w funkcji prądu obliczoną w programie.



Rys. 4.32. Charakterystyka momentu mechanicznego w funkcji prądu

Na rys. 4.33. 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 elektromagnetycznego (M_e), momentu mechanicznego (M_m).

Zestawienie charakterystyk rozrusznika w programie LabView przedstawiono w pracy autora pt. „Modelowanie i eksperymentalne badania obwodu rozruchowego w środkach transportu” [33].



Rys. 4.33. Połączenie blokowe do wyznaczenia charakterystyk: $E_A=f(I)$ – siła elektromotoryczna akumulatora, $E_R=f(I)$ – siła elektromotoryczna rozrusznika, $U_R=f(I)$ – napięcie na rozruszniku, $\Phi=f(I)$ – strumień magnetyczny, $M_e=f(I)$ –moment elektromagnetyczny, $M_m=f(I)$ –moment mechaniczny, $P_m=f(I)$ – moc mechaniczna, $P_e=f(I)$ –moc elektryczna, $n=f(I)$ – prędkość obrotowa.

5. Analiza eksploatacyjnego zużycia rozruszników

Eksplatacja rozrusznika jest działaniem realizowanym przez zdarzenia eksploatacyjne, które realizują cel w określonych warunkach, zgodnie z posiadanymi środkami, poprzez przebiegające procesy (eksploatacyjne), dając skutek tego działania wynik [91].

Problematyka eksploatacji obejmuje [91]:

- problematykę celu (ilościowe formułowanie celu, zapamiętywanie go i wykorzystywanie jako informacyjnego wzorca w działaniu);
- problematykę warunków eksploatacji (okoliczności, wymagań stawianych podmiotowi i cech, jakie musi posiadać obiekt techniczny itp.);
- problematykę przebiegu eksploatacji (etapy: przygotowania koncepcyjnego i rzeczowego, realizacji oddziaływań, oceny działania itp.);
- problematykę środków (wiedzy i umiejętności człowieka oraz jego oddziaływań: obsługowo – naprawczych, konserwacyjno zabezpieczających, a także diagnozowania itp.);
- problematykę oceny (skuteczności działania przez porównanie wyniku z celem, przebiegu przez porównanie go z planem, nakładów itp.).

Wiedza o eksploatacji zawiera cztery funkcje: wyjaśniającą, opisującą, inspirowającą i praktyczną. Zakres tych funkcji sugeruje możliwość podziału wiedzy na część teoretyczną – eksploatykę i praktyczną (normatywną) – inżynierię eksploatacji [91]. Różnice między eksploatyką a inżynierią eksploatacji zestawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Zakres nauki o eksploatacji według kryteriów wiedzy [91]

NAUKA O EKSPLOATACJI		
Kryteria	EKSPLOATYKA Część teoretyczna	INŻYNIERIA EKSPLOATACJI Część teoretyczna
Główny cel badań	Wyjaśnianie faktów	Wskazywanie, jak działać
Kryterium wiedzy	Prawdziwość wypowiedzi	Skuteczność wskazywanych metod
Przedmioty badań	Rzeczywiste – istniejące obecnie, z przeszłości lub w przyszłości	Obiekty techniczne i systemy, które można dopiero zrealizować lub istnieją
Charakter treści	Treść składa się głównie z zdań logicznych i opisowych	Treść składa się ze zdań logicznych, normatywnych i oceniających
Oceny	Weryfikacja praktyczna	Wynik działania
Dyrektywy	Brak dyrektyw postępowania	Zawierają dyrektywy
Układ treści	Według istotnych cech badanych przedmiotów i obszarów, relacji i zdarzeń	Według celów praktycznych i czynników ich realizacji

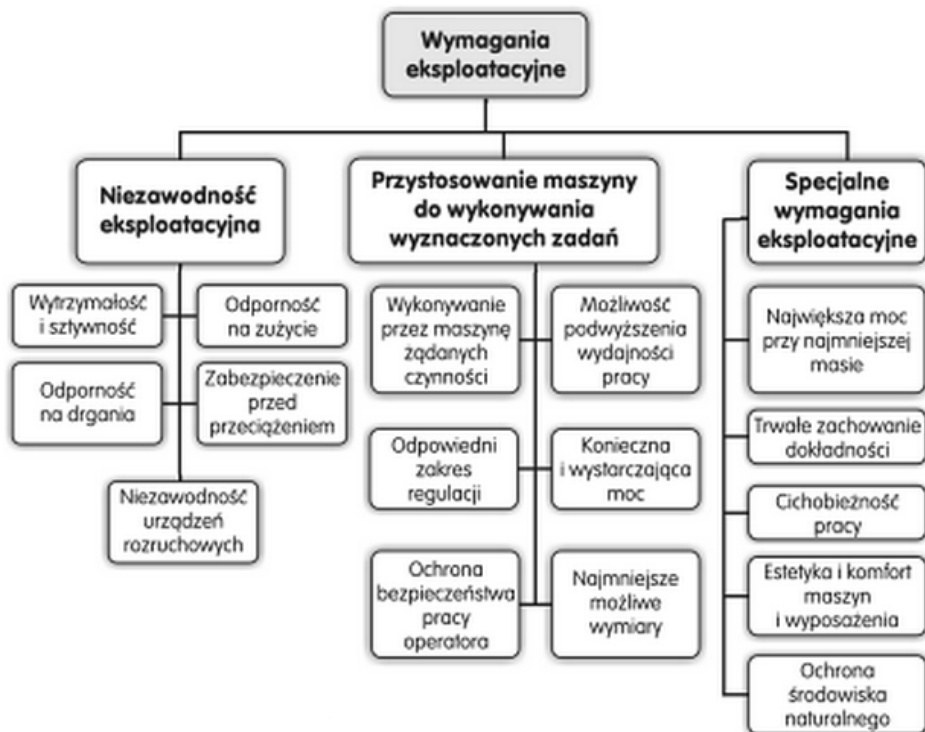
Eksplotacja jest to ciąg działań, procesów i zjawisk związanych z wykorzystywaniem obiektów technicznych przez człowieka. Celem tych działań jest zaspokojenie potrzeb związanych pośrednio lub bezpośrednio z jego potrzebami żywioowymi. W procesie eksploatacji wyodrębnia się cztery rodzaje działań (rys. 5.1):

- Użytkowanie – to wykorzystywanie obiektu technicznego zgodnie z jego przeznaczeniem i właściwościami funkcjonalnymi;
- Obsługiwanie – to utrzymywanie obiektu w stanie zdolności oraz przywracanie mu wymaganych właściwości funkcjonalnych dzięki przeglądom, regulacjom, konserwacji, naprawom i remontom;
- Zasilanie – polega na dostarczaniu do obiektu materiałów (masy), energii, zwłaszcza w odniesieniu do urządzeń sterowanych numerycznie;
- Zarządzanie – są to procesy planistyczno-decyzyjne (dotyczące planowania działań i podejmowania decyzji) oraz sprawozdawczo-analityczne (dotyczące opracowywania sprawozdań i ich analizy).



Rys. 5.1. Działania w procesie eksploatacji [89]

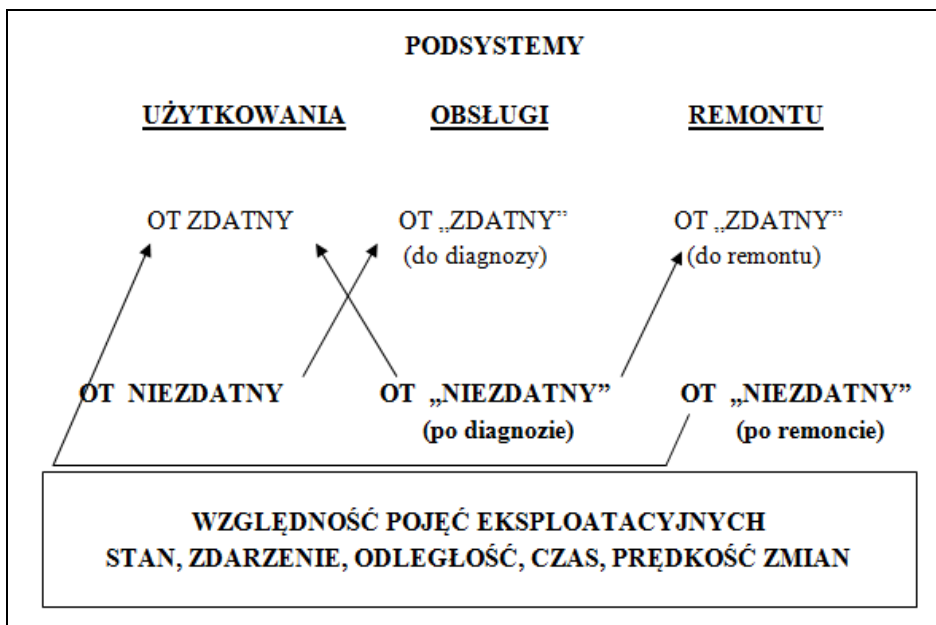
Zasadniczym dążeniem w budowie i eksploatacji maszyn jest zapewnienie im jak najdłuższego prawidłowego działania, przez co muszą spełniać odpowiednie wymagania (rys. 5.2). Użytkowanie powoduje, że stan fizyczny rozrusznika pogarsza się, a następnie jest okresowo przywracany do stanu dalszego użytkowania [89].



Rys. 5.2. Wymagania eksploatacyjne [89]

Zdarzenie eksploatacyjne jest to proces przejścia z jednego stanu do innego, zachodzący w przestrzeni eksploatacyjnej i czasie [91].

Z punktu widzenia różnych podsystemów eksploatacji (użytkowania, obsługi, remontu, magazynowania) zdarzenia eksploatacyjne, miejsce, odległości eksploatacyjne oraz czas w przestrzeni eksploatacyjnej nie mają tych samych cech uniwersalnych. Stan eksploatacyjny obiektu technicznego zdefiniowany jako „niezdalny” z punktu widzenia podsystemu użytkowania, gdy wymaga obsługi diagnostycznej, jest stanem w podsystemie obsługi. Po przywróceniu cech użytkowych, staje się obiektem zdalnym, a wprowadzony do podsystemu użytkowania jest obiektem o cechach pełnej zdalności z określonym zapasem energii eksploatacyjnej [91].



Rys. 5.3. Podsystemy eksploatacji

Podatnością eksploatacyjną określa się właściwości rozrusznika określające jego możliwości eksploatacyjne. Obejmują one podatność użytkową, obsługową oraz diagnostyczną. Podatność eksploatacyjna kształtuje się już podczas projektowania, uwzględniając dodatkowe wymagania wynikające z prawdopodobnych sytuacji i warunków eksploatacyjnych [91].

Podatność użytkowa to przystosowanie rozrusznika do realizacji procesu użytkowania. Zależy ona od dyspozycyjności rozrusznika; zakresu i efektywności jego wykorzystania, podatności operacyjnej, ergonomiczności, dostosowania do systemu eksploatacji, bezpieczeństwa użytkowników i nieuciążliwości dla środowiska naturalnego.

Dyspozycyjność rozrusznika wynika z niezawodności, łatwości i szybkości uruchomienia, natomiast efektywność pracy określa jego parametry techniczne, w tym również dokładność pracy oraz uzyskiwane wskaźniki ekonomiczne [91].

Ważną cechą eksploatacyjną jest podatność pomiarowa, która umożliwia szybką i trafną ocenę pracy oraz stanu zużycia rozrusznika za pomocą pomiarów w wybranych ich fragmentach oraz przyjętego systemu pomiarów i interpretacji wyników. Usprawnienie pomiarów polega na automatyzacji, rejestracji oraz sygnalizacji wyników pomiarowych [73–75, 91, 107–111, 114, 115, 138, 139].

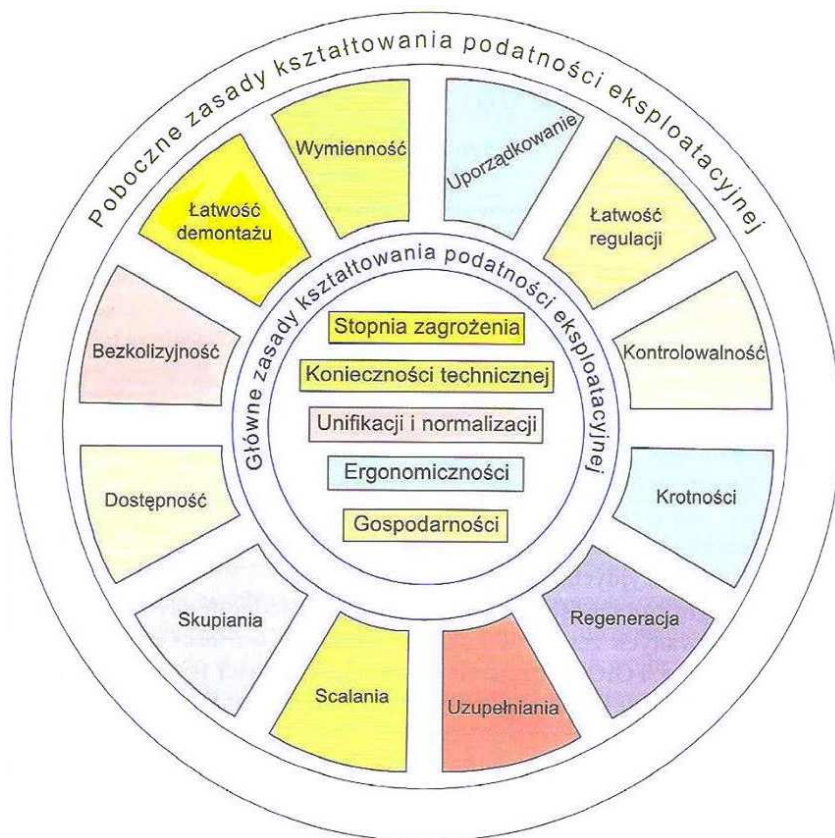
Podatność obsługowa to przystosowanie rozrusznika do regulacji, dokonywania przeglądów i napraw. Decyduje o niej podatność: na kontrolowanie stanu konserwacyjno-naprawczego.

O podatności naprawczej decydują [26–28, 91]:

- normalizacja części,
- rozłączalność części,
- łatwość regeneracji części i ich montażu,
- łatwość regulacji montażowej.

Podatność diagnostyczna to przystosowanie rozruszników do realizacji ciągu czynności pozwalających na łatwe uzyskanie informacji o jego stanie technicznym. Umożliwia to decydowanie o dalszym użytkowaniu rozrusznika i jego obsłudze.

W celu uzyskania najkorzystniejszych wskaźników podatności eksploatacyjnej: czasochłonności, pracochłonności i materiałochłonności technicznej obsługi i odnowy oraz uproszczenia procesów technologicznych stosuje się następujące zasady poboczne przedstawione na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Zestawienie zasad uwzględnianych w analizie i syntezie podatności eksploatacyjnej: obsługowej i remontowej (Techniczna Obsługa i Odnowa) [90]

5.1. Modelowanie eksploatacyjnego zużycia elementów rozrusznika

Modelowanie systemu eksploatacji jest to proces dokonywania wyboru elementów, które odznaczają się cechami istotnymi z uwagi na przyjęte kryterium dla modelu i procesu poznawczego, zapewniające taką postać programu badania modelu, który pozwoli uzyskać zakładany efekt.

Modele systemów eksploatacji [9, 11–13, 89, 92, 152–158] tworzy się w celu:

- doskonalenia, optymalizowania kosztów i otrzymywanych rezultatów działającego systemu;
- tworzenia nowego systemu;
- unowocześniania systemu w wyniku postępu technicznego.

Rozwój teorii modeli i modelowania systemów daje całą gamę możliwości zastosowania ich w praktyce. Istnieją dwie podstawowe grupy modeli:

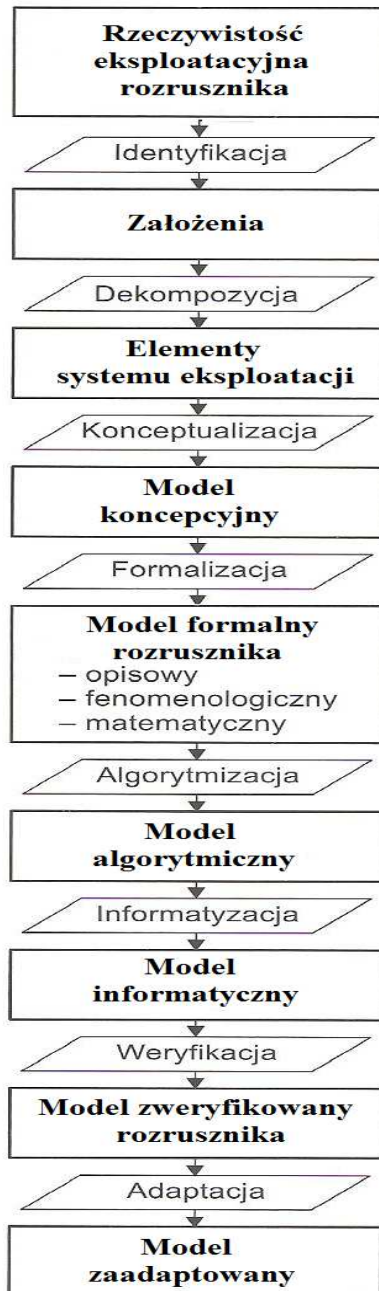
- materialne – zwane fizycznymi, są to wykonane w różnej skali obiekty materialne i nie mogą być wykorzystywane w modelowaniu systemu antropotechnicznego, jakim jest każdy system eksploatacji,
- teoretyczne – są przydatne do opisu systemu eksploatacji. Wśród nich można wyróżnić modele: intuicyjne, sformalizowane, analogowe, symboliczne, graficzne, informatyczne, strukturalne.

Istotą modelowania jest także wydobycie nowych informacji o modelu dla celów niezbędnych do kierowania, sterowania i zarządzania systemem eksploatacji oraz do pogłębiania wiedzy o skuteczności miar niezbędnych dla oceny efektywności systemu eksploatacji [29–31, 38–47, 92, 117–121, 126, 127].

Szczególnie ważną rolę w działalności systemu eksploatacji odgrywają modele decyzyjne. Ich badanie możliwe jest metodami: matematycznymi, neuronowymi (sztucznych sieci neuronowych), symulacyjnymi.

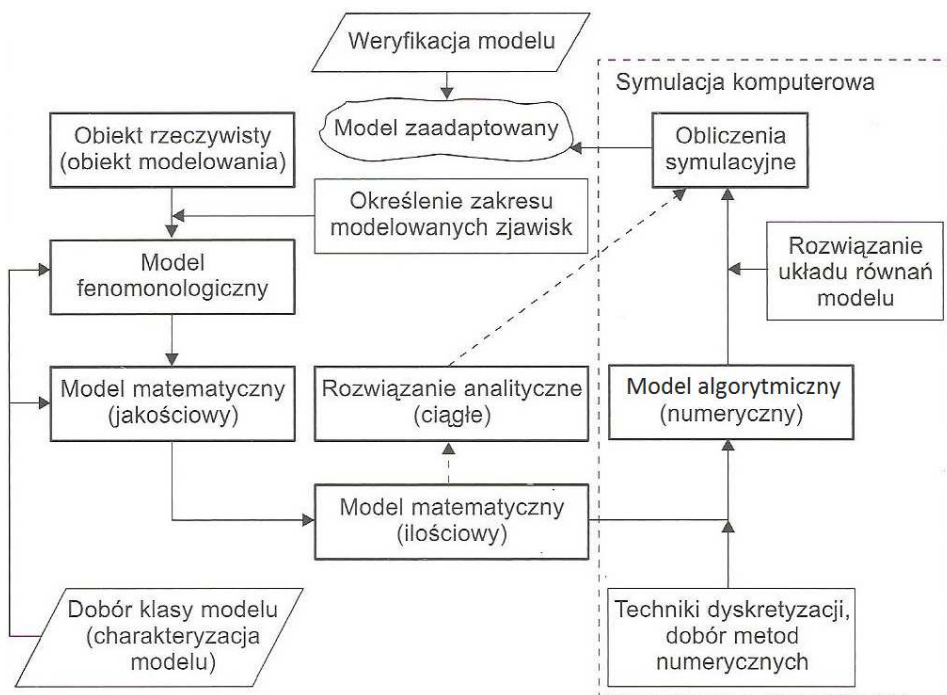
W zależności od charakteru zmiennych wykorzystywanych w modelach szczególną rolę mają modele deterministyczne i probabilistyczne. W modelach deterministycznych stosowane zmienne przyjmują jednoznacznie określone wartości liczbowe. Na ogół są one wyliczane z zależności otrzymywanych w wyniku rozwiązywania opracowanych układów równań. Rozwiązywanie układów równań dla tej klasy modeli przeprowadza się przy zastosowaniu odpowiednich działów algebry (najczęściej jest to programowanie liniowe lub nieliniowe). W modelu probabilistycznym wykorzystywane są zmienne losowe o znanych rozkładach [66–69, 92].

Uzyskanie modelu zadowalającego oczekiwania jest efektem całej sekwencji, a więc odpowiednio następujących po sobie, właściwych działań. Zbiorowość modeli jest bardzo różnorodna, jednak wszystkie tworzone są według jednej, ogólnej metodologii. Procedurę modelowania systemów i podsystemów eksploatacji przedstawia rysunek 5.5.



Rys. 5.5. Procedura modelowania systemów i podsystemów eksploatacji [92]

Etapy modelowania matematycznego [24, 58–60, 76–78, 90–93] połączonego z symulacją komputerową przedstawiono na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Etapy procesu modelowania matematycznego i symulacji komputerowej [92]

Jako stan uszkodzenia uznaje się taki stan rozrusznika, który uniemożliwia dalsze działanie oraz dalszą eksploatację i może wywołać natychmiastowe uszkodzenie współpracujących ze sobą zespołów w rozruszniku.

Za stan uszkodzenia układu łożyskowego rozrusznika, uznano taki stan łożysk, po osiągnięciu, którego, podczas dalszej eksploatacji nie można doprowadzić do zazębienia zębika z kołem zamachowym lub wystąpi ocieranie wirnika o nabiegunniki.

Do wyznaczenia stanu granicznego niezbędna jest, między innymi, graniczna wartość luzu łożyskowego, powiększonego wskutek zużycia.

Do ustalenia granicznej wartości luzu przyjęto model rozrusznika [15–17, 136, 137] obejmujący stojan, pokrywy łożyskowe z tulejkami oraz wirnik. W modelu przyjęto następujące założenia:

- Osie wirnika, stojana i pokryw łożyskowych leżą w jednej płaszczyźnie. Przypadek ten może zdarzyć się i umożliwia uzyskanie największych przemieszczeń osi wirnika, pokryw i stojana;

- Stojan, wirnik, pokrywy i tulejki są sztywne. Założenie takie przyjęto w celu umożliwienia obliczeń, z uwagi na skomplikowany kształt wirnika, pokryw i stojana oraz nieznane własności materiałowe i ich części składowych. Ponadto wirnik rozrusznika odznacza się w rzeczywistości dużą sztywnością;
- Odchyłka współosiowości otworu panewki względem zewnętrznej powierzchni tulejki jest liczbowo równa odchyłkom współosiowości z V szeregu;
- Wartość odchyłki współosiowości otworu tulejki w pokrywie względem powierzchni walcowej E lub H pokrywy – jest sumą współosiowości otworu w pokrywie, w który jest włączana tulejka, względem powierzchni walcowej E lub H pokrywy oraz współosiowości otworu tulejki względem zewnętrznej powierzchni walcowej nowej tulejki. Takie założenie przyjęto z powodu nieznamośności stanu odkształcenia tulejek po wciśnięciu w otwory pokrywy;
- Pominięto wartości chropowatości poszczególnych powierzchni, jako małe;
- Odchyłki kształtów czopów wirnika są liczbowo równe odchyłkom kołowości z II szeregu, które są uzyskiwane dla typowych warunków szlifowania;
- Odchyłki kształtu: powierzchni walcowej wirnika, powierzchni walcowych F i G stojana, wewnętrznej powierzchni nabiegunników stojana, powierzchni walcowej H pokrywy przedniej, powierzchni walcowej E pokrywy tylnej oraz powierzchni otworów tulejek przedniej i tylnej są liczbowo równe odchyłkom kołowości z V szeregu, które są uzyskiwane dla typowych warunków toczenia;
- W celu uproszczenia obliczeń założono równoległość osi wirnika i osi czopów;
- W celu uproszczenia obliczeń założono równoległość osi powierzchni walcowych F i G stojana z osią nabiegunników;
- W celu uproszczenia obliczeń założono równoległość osi otworu tulejki względem osi pokrywy, w której osadzono tulejkę;
- Wykonane przykładowo obliczenia dotyczą przypadku, gdy występuje styk powierzchni walcowych E i H pokryw z górnymi tworzącymi powierzchni walcowych, odpowiednio F i G, stojana. Przy takim ustawieniu pokryw względem stojana, czopy wirnika są podparte na wewnętrznych powierzchniach czołowych tulejek. z uwagi na większą wartość kąta α_2 , w stosunku do wartości kąta α_1 w rozważanym przypadku współrzędna wsc_1 środka przedniego czopa jest większa niż współrzędna wsc_2 środka tylnego czopa. Decyduje to o kierunku nachylenia osi czopów wirnika względem osi X;

-

82

Analiza eksploatacyjnego zużycia rozrusznika E100

Zgodnie z rysunkami (rys. 5.7–5.8) poszczególne części w modelu posiadają następujące wymiary i odchyłki:

- średnica otworu panewki w pokrywie przedniej
 $D_1 = (\text{nowy } 12,05 \div 12,07; \text{ zużyty } - 12,2) \text{ mm};$
- odchyłka kształtu otworu panewki w pokrywie przedniej lub tylnej
 $od_1 = 0,003 \text{ mm};$
- średnica otworu tulejki w pokrywie przedniej, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $D_1^* = (D_1 + od_1) = (\text{nowy } 12,047 \div 12,073, \text{ zużyty } - 12,203) \text{ mm};$
- średnica przedniego czopa wirnika
 $d_1 = (\text{zużyty } 11,975 - , \text{ nowy } 11,985 \div 12) \text{ mm};$
- odchyłka kształtu przedniego lub tylnego nowego czopa wirnika
 $od_2 = 0.0008 \text{ mm};$
- odchyłka kształtu przedniego lub tylnego zużytego czopa wirnika,
 $od_2 = 0.003 \text{ mm};$
- średnica przedniego czopa f wirnika, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $d_1^* = (d_1 + od_2) - (\text{zużyty } 11,975, \text{ nowy } 11,9842 \div 12,0008) \text{ mm};$
- długość przedniej tulejki
 $l_1 = 15 \text{ mm};$
- średnica powierzchni walcowej H przedniej pokrywy
 $Dp_1 = (88,458 \div 88,5) \text{ mm};$
- odchyłka kształtu powierzchni walcowej H przedniej pokrywy,
 $od_3 = 0.01;$
- średnica powierzchni walcowej H przedniej pokrywy, po uwzględnieniu odchyłek kształtu.
 $Dp_1^* = (Dp_1 + od_3) = (88,358 \div 88,51) \text{ mm};$
- długość pokrywy przedniej
 $lp_1 = 55 \text{ mm};$
- średnica powierzchni walcowej G stojana
 $ds_1 = (89,381 \div 89,4);$
- odchyłka kształtu powierzchni walcowych G i F stojana
 $od_4 = 0.01 \text{ mm};$
- średnica powierzchni walcowej G stojana, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $ds_1^* = (ds_1 + od_4) = (89,371 \div 89,41) \text{ mm};$
- średnica otworu tulejki w pokrywie tylnej
 $D_2 = (\text{nowy } 12,05 \div 12,07, \text{ zużyty } - 12,2) \text{ mm};$

- średnica otworu tulejki w pokrywie tylnej, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $D_2^* = (D_2 + od_1) = (\text{nowy } 12,047 \div 12,073, \text{ zużyty } - 12,203) \text{ mm};$
- średnica tylnego czopa wirnika
 $d_2 = (\text{zużyty } 11,975 - \text{nowy } 11,985 \div 12);$
- średnica tylnego czopa wirnika, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $d_2^* = (d_2 + od_2) = (\text{zużyty } 11,972, \text{ nowy } 11,9842 \div 12,0008) \text{ mm};$
- długość tylnej tulejki
 $l_2 = 25 \text{ mm};$
- średnica powierzchni walcowej E tylnej pokrywy
 $Dp_2 = (88,47 \div 88,5) \text{ mm};$
- odchyłka kształtu powierzchni walcowej E tylnej pokrywy
 $od_5 = 0.2;$
- średnica powierzchni walcowej E tylnej pokrywy, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $Dp_2^* = (Dp_2 + od_5) = (88,27 \div 88,7) \text{ mm};$
- długość pokrywy tylnej
 $lp_2 = 107 \text{ mm};$
- średnica powierzchni walcowej F stojana
 $ds_2 = (89,4 \div 89,419) \text{ mm};$
- średnica wewnętrzna stojana (średnica nabiegunników)
 $Ds = (68 \div 68,15) \text{ mm};$
- odchyłka wewnętrznej powierzchni stojana (powierzchni nabiegunników)
 $od_6 = 0.01 \text{ mm};$
- średnica wewnętrzna stojana, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $Ds^* = (Ds + od_6) = (67,16 \div 67,99) \text{ mm};$
- średnica wirnika
 $d_w = (66,95 \div 67) \text{ mm};$
- odchyłka kształtu powierzchni walcowej wirnika
 $od_7 = 0.01 \text{ mm};$
- średnica wirnika, po uwzględnieniu odchyłek kształtu
 $d_w^* = (d_w + od_7) = (66,94 \div 66,99) \text{ mm};$
- długość rozrusznika
 $H = 291 \text{ mm};$
- odległość powierzchni czołowej P wirnika od przedniego końca wirnika
 $lw_1 = 78 \text{ mm};$
- odległość powierzchni czołowej Q wirnika od tylnego końca wirnika
 $lw_2 = 133 \text{ mm};$
- odległość między powierzchniami czołowymi P i Q wirnika
 $lw = 80 \text{ mm};$

- wymagana szczelina między walcową powierzchnią wirnika i wewnętrzną walcową powierzchnią nabiegunków
 $sc = (0.45 \div 0.55) \text{ mm};$
- odl_1 – najmniejsza odległość punktów okręgu modelowego wirnika w płaszczyźnie P, przyjmuje się z zależności
 $odl_1 = 0.1 * sc = (0.045 \div 0.055) \text{ mm};$
- odl_2 – najmniejsza odległość punktów okręgu modelowego wirnika w płaszczyźnie Q, przyjmuje się z zależności
 $odl_2 = 0.1 * sc = (0.045 \div 0.055) \text{ mm};$
- α_1 – kąt między osią pokrywy przedniej a osią x przy czym α_1 wyznaczono z zależności

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{opp_1}{lp_1}\right) + \arctg\left(\frac{2ops_1}{ds_1^*}\right) = 0,003146rd \quad (5.1)$$

- α_2 – kąt między osią pokrywy tylnej a osią x, przy czym α_2 wyznaczono z zależności

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{opp_2}{lp_2}\right) + \arctg\left(\frac{2ops_2}{ds_2^*}\right) = 0,00589rd \quad (5.2)$$

- odchyłka współosiowości osi czopa i osi wirnika
 $oww = 0.1 \text{ mm};$
- odchyłka prostopadłości osi nabiegunków od powierzchni czołowej D stojana
 $opsl = 0.1 \text{ mm};$
- odchyłka współosiowości osi nabiegunków i osi powierzchni walcowej G stojana oraz odchyłka współosiowości osi nabiegunków i osi powierzchni walcowej F stojana
 $ows = 0.1 \text{ mm};$
- przesunięcie w płaszczyźnie C: osi powierzchni walcowej G stojana i osi powierzchni walcowej H przedniej pokrywy, w granicach luzu między tymi powierzchniami $olp - sl = ols - pl$, przy czym $ols - pl$ wyznaczono z zależności

$$ols - pl = \frac{Dp_1^*}{2 \cos(\alpha_1)} - \frac{ds_1^*}{2} \approx \frac{Dp_1^*}{2} - \frac{ds_1^*}{2} \quad (5.3)$$

i wynosi $ols - pl = (0.45 \div 0.507) \text{ mm};$

- dla przykładowych wartości $Dp_1^* = 88,358$, $ds_1 = 89,371$, błąd wynikający z pominięcia wpływu kąta α_1 na wynik obliczenia wartości $ols - pl$ jest mały i wynosi 0.4%;
- odchyłka prostopadłości osi powierzchni walcowej H przedniej pokrywy t od powierzchni czołowej D przedniej pokrywy
 $opp_1 = 0.05 \text{ mm};$

- odchyłka współosiowości otworu w przedniej pokrywie i powierzchni walcowej H przedniej pokrywy
 $owp_1^* = 0,02 \text{ mm}$;
- odchyłka współosiowości otworu tulejki i zewnętrznej powierzchni walcowej przedniej tulejki
 $opow_1 = 0.005 \text{ mm}$;
- odchyłka współosiowości osi otworu tulejki w przedniej pokrywie i osi powierzchni walcowej H przedniej pokrywy
 $owp_1 = owp_1^* + opow_1 = 0.025 \text{ mm}$;
- wsp_1 – odległość środka otworu przedniej panewki od osi x, przy czym wsp_1 wyznaczono z zależności

$$wsp_1 = \frac{Ds^*}{2} - ows - (ols - p_1) - lp_1 \alpha_1 - owp_1 \cos \alpha_1 - \frac{l_1}{2} \sin \alpha_1 \quad (5.4)$$

- dla przykładowych wartości $Ds_{\max}^* = 68,16 \text{ mm}$, $ols - pl_{\min} = 0,507$ w wyniku obliczeń uzyskano wartość: $wsp_{1\max} = 33,305 \text{ mm}$;
- dla przykładowych wartości $Ds_{\min}^* = 67,99 \text{ mm}$, $ols - pl_{\max} = 0,47 \text{ mm}$, w wyniku obliczeń uzyskano wartość $wsp_{1\min} = 33,248 \text{ mm}$;
- odchyłka prostopadłości osi nabiegunków od powierzchni czołowej a stojana
 $ops_2 = 0.1 \text{ mm}$;
- przesunięcie w płaszczyźnie B: osi powierzchni walcowej F stojana i osi powierzchni walcowej E tylnej pokrywy, w granicach luzu między tymi powierzchniami $olp - s_2 = ols - p_2$, przy czym $ols - p_2$ wyznaczono z zależności

$$ols - p_2 = \frac{dp_2^*}{2 \cos \alpha_2} - \frac{ds_2^*}{2} \approx \frac{Dp_2^*}{2} - \frac{ds_2^*}{2} \quad (5.5)$$

i wynosi $ols - p_2 = (0,359 - 0,565) \text{ mm}$;

- dla przykładowych wartości $Dp_2^* = 89,4$, $ds_2^* = 88,27$, błąd wynikający z pominięcia wpływu kąta α_1 na wynik obliczenia wartości $ols - p_2$ jest niewielki i wynosi 0.2%;
- odchyłka prostopadłości osi powierzchni walcowej E tylnej pokrywy a od powierzchni czołowej a tylnej pokrywy
 $opp_2 = 0.15 \text{ mm}$;
- odchyłka współosiowości otworu w tylnej pokrywie i powierzchni walcowej E tylnej pokrywy
 $owp_2^* = 0.1 \text{ mm}$;
- odchyłka współosiowości otworu przedniej tulejki względem zewnętrznej powierzchni walcowej tylnej panewki
 $opow_2 = 0.005 \text{ mm}$;

- odchyłka współosiowości otworu panewki w tylnej pokrywie i powierzchni walcowej E tylnej pokrywy
 $owp_2 = owp_2^* + opow_2 = 0.105 \text{ mm}$;
- wsp_2 – odległość środka otworu tylnej panewki od osi x przy czym wsp_2 wyznaczono z zależności

$$wsp_2 = \frac{Ds^*}{2} - ows - (ols - p_2) - lp_2(\alpha_2) - owp_2 \cos \alpha_2 - \frac{l_2}{2} \sin \alpha_2 \quad (5.6)$$

dla przykładowych wartości $Ds^*_{\max} = 68,16 \text{ mm}$, $ols - p_{2\min} = 0,565 \text{ mm}$,
w wyniku obliczeń uzyskano wartość: $wsp_{2\max} = 32,52 \text{ mm}$
dla przykładowych wartości $D^*_{\min} = 67,99 \text{ mm}$, $ols - p_{2\max} = 0,359 \text{ mm}$,
w wyniku obliczeń uzyskano wartość $wsp_{2\min} = 32,021 \text{ mm}$;

- β – kąt między osią wirnika lub osią czopów a osią x wyznaczono z zależności

$$tg(\beta) = \frac{\left[wsp_1 \left(\frac{D^*_1}{2} \cos \alpha_1 - \frac{l_1}{2} \sin \alpha_1 \right) \right] - \left[wsp_2 - \left(\frac{D^*_2}{2} \cos \alpha_2 - \frac{l_2}{2} \sin \alpha_2 \right) \right]}{H - (l_1 + l_2)} \quad (5.7)$$

w wyniku obliczeń otrzymano wartość $\beta_{\min} = 0,00205 \text{ rd}$,

w wyniku obliczeń otrzymano wartość $\beta_{\max} = 0,02345 \text{ rd}$;

- β_1 – kąt między osią czopa i osią tulejki w przednim łożysku, przy czym
 $\beta_1 = \beta + \alpha_1$

$$\beta_{1\min} = 0,00524$$

$$\beta_{1\max} = 0,02664;$$

- β_2 – kąt między osią czopa i osią tulejki w tylnym łożysku, przy czym
 $\beta_2 = \alpha_2 - \beta$

$$\beta_{2\max} = 0,00385$$

$$\beta_{2\min} = 0,02026$$

wsc_1 – odległość środka przedniego czopa od osi x, przy czym wsc_1 wyznaczono z zależności

$$wsc_1 = odl_1 + \frac{dw^*}{2} + lw_1 \cdot \beta - \frac{oww}{2} \cos \beta \quad (5.8)$$

- dla przykładowych wartości $dw^*_{\max} = 66,99 \text{ mm}$, $\beta = 0.02345 \text{ rd}$,
 $odl_1 = 0,045 \text{ mm}$ uzyskano w wyniku obliczeń wartość $wsc_{1gr} = 35,319 \text{ mm}$;
- dla przykładowych wartości $dw^*_{\min} = 66,94 \text{ mm}$, $\beta = 0.00205 \text{ rd}$,
 $old = 0,055 \text{ mm}$ uzyskano w wyniku obliczeń wartość $wsc_{1gr} = 33,635 \text{ mm}$;
- wsc_2 – odległość środka tylnego czopa od osi x, przy czym wsc_2 wyznaczono z zależności

$$wsc_2 = old_2 + \frac{dw^*}{2} - lw_2 \beta - \frac{oww}{2} \cos \beta \quad (5.9)$$

- dla przykładowych wartości $dw_{\max}^* = 66,99$ mm, $\beta = 0,02345$ rd, $old_2 = 0.045$ mm uzyskano w wyniku obliczeń wartość $wsc_{2gr} = 30,3712$ mm;
- dla przykładowych wartości $dw_{\min}^* = 66,94$ mm, $\beta = 0,00205$ rd, $old_2 = 0.055$ mm uzyskano w wyniku obliczeń wartość $wsc_{2gr} = 31,202$ mm;
- minimalną wartość luzu montażowego w łożyskach obliczono z zależności

$$(D_{1,2}^* - d_{1,2}^*)_{\min} = l_{1,2} \operatorname{tg} \beta_{1,2\max} \quad (5.10),$$

- graniczna wartość kąta przekoszenia osi czopa i tulejki wynosi $\beta_{1,2\max} = \beta_2 = 0,00564$ rd;
- minimalną wartość luzu montażowego obliczono z zależności

$$(D_{1,2}^* - d_{1,2}^*)_{\min} = l_2 \operatorname{tg} \beta_2 = l_2 \operatorname{tg}(\alpha_2 - \beta_{\min}) \quad (5.11)$$

- minimalna wartość luzu w łożysku wynosi $(D_{1,2}^* - d_{1,2}^*)_{\min} = 0.096$ mm. Przyjęto, że luz w łożyskach osiąga wartość dopuszczalną, jeżeli szczelina między wirnikiem i stojanem osiąga wartość wielkości odl_1 lub odl_2 ;
- wartość luzu dopuszczalnego można wyznaczyć z zależności 5.12 lub 5.13

$$(D_1^* - d_1)_{gr} = 2 \left(wsp_{1\max} - wsc_{1gr} + \frac{l_1}{2} \sin \alpha_1 + \frac{l_1}{2} \sin \beta_{\min} \right) = \quad (5.12)$$

$$2 \left(\frac{D_{s\max}^* - dw_{\min}^*}{2} + lw_1 \beta_{\min} - lp_1 \alpha_1 - \frac{oww}{2} \cos \beta_{\min} - odl_1 - ows - \frac{l_2}{2} \sin \alpha_1 - ols - p_1 - owp_1 \cos \alpha_1 \right)$$

$$(D_2^* - d_{21})_{gr} = 2 \left(wsp_{2\max} - wsc_{2gr} + \frac{l_2}{2} \sin \alpha_2 + \frac{l_2}{2} \sin \beta_{\min} \right) = \quad (5.13)$$

$$2 \left(\frac{D_{s\max}^* - dw_{\min}^*}{2} + lw_1 \beta_{\min} - lp_2 \alpha_2 - \frac{oww}{2} \cos \beta_{\min} - odl_2 - ows - \frac{l_2}{2} \sin \alpha_2 - ols - p_2 - owp_2 \cos \alpha_2 \right)$$

- dla przykładowych wartości $wsp_{1\max} = 33,248$ mm, $wsc_{1gr} = 35,319$ mm, $\beta = 0.00205$ rd, w wyniku obliczeń uzyskano wartość $(D_1^* - d_1^*)_{gr} = 0.072$ mm;
- dla przykładowych wartości $wsp_2^* = 33,52$ mm, $wsc_{1gr} = 30,371$ mm, $\beta = 0.00205$ rd, w wyniku obliczeń uzyskano wartość $(D_2 - d_2)_{gr} = 0,065$ mm.

Przyjęto, że dopuszczalna wartość luzu wynosi 0.065 mm.

Dobór wielkości luzu z przyjętego zakresu, nie gwarantuje poprawnego skojenia wirnika, stojana i pokryw. Nawet przy małych wartościach luzu w łożyskach, w wyniku działającego zewnętrznego układu sił na wirnik, może dochodzić do kasowania szczeliny między wirnikiem i stojanem. w poprawnie pracującym rozruszniku zawsze występuje oparcie czopa wirnika o krawędź panewki, w przednim i tylnym łożysku. Powinien być wtedy spełniony geometryczny warunek, opisany zależnością

$$wsc_1 = wsp_1 - \left[\left(\frac{D_1^*}{2} - \frac{d_1^*}{2} \right) + \frac{l_1}{2} \sin \alpha_1 + \frac{l_1}{2} \sin \beta \right] \quad (5.14)$$

$$wsc_1 = 32,739 \text{ mm.}$$

Wielkość szczeliny między wirnikiem i stojanem można wyznaczyć z zależności

$$sz = wsc_1 - \frac{dw^*}{2} - lw_1\beta + \frac{oww}{2} \quad (5.15)$$

W przypadku skasowania szczeliny między wirnikiem i stojanem wartość wielkości $sz = 0$ mm, zaś wartość współrzędnej wsc_1 może być wyznaczona z zależności

$$wsc_1 = \frac{dw_{\max}^*}{2} + lw_1\beta - \frac{oww}{2} \quad (5.16)$$

Przykładowo dla wartości $dw_{\max}^* = 52.51$ mm, $\beta = 0.00072$ rd, w wyniku obliczeń otrzymano wartość $wsc_1 = 26.28$ mm. Uzyskana wartość wsc_1 nie spełnia warunku, mim tych samych wartości pozostałych parametrów i występowania styku czopa i panewki w tylnym łożysku. Świadczy to o wystąpieniu braku styku czopa i panewki w przednim łożysku. Wirnik jest podparty w tylnym łożysku i na stojanie, co odpowiada uszkodzeniu rozrusznika. Na ogół jednak, podczas montażu istnieje możliwość takiego skorygowania położenia stojana i pokryw, aby podparty w łożyskach wirnik nie ocierał w żadnym swoim położeniu o nabiegunniki.

Maksymalne przemieszczenie osi wirnika względem osi nabiegunników stojana obliczono z zależności

$$\Delta_1 = |Ds_{\max}^* / 2 - dw_{\min}^* / 2| = 1,17 \quad (5.17)$$

Wynika stąd, że na wzajemne przemieszczenie osi wirnika i osi nabiegunników, najbardziej wpływa luz łożyskowy, promieniowe przemieszczenie tylnej pokrywy względem stojana oraz odchyłki prostopadłości powierzchni czołowych E stojana względem osi nabiegunników oraz powierzchni czołowych E pokryw względem osi powierzchni walcowych E i H pokryw. Ponieważ luz zmienia się podczas pracy układu łożyskowego rozrusznika, dlatego można przyjąć, że luz łożyskowy decyduje o uzyskiwaniu stanu awaryjnego, jakim jest ocieranie wirnika o nabiegunniki stojana. Można przewidywać, że uszkodzenie układu łożyskowego wystąpi, gdy wartość względnego luzu w łożyskach, przekroczy wartość obliczoną z zależności 5.18 – prawdopodobieństwo uszkodzenia dla losowo badanych łożysk oblicza się:

$$\frac{D_{1\max}^* - d_{1\min}^*}{D_1} = \frac{12,073 - 11,984}{12,05} = 0,0074 * 100\% = 0,74\% \quad (5.18)$$

5.2. Analiza uszkodzeń rozruszników w eksploatacji pojazdów

Rozruszniki w środkach transportu pracują przy bardzo niekorzystnych i zmiennych warunkach eksploatacji, do których należą: zmienna temperatura

pracy, dynamicznie zmienne obciążenie mechaniczne, a także warunki klimatyczne. W efekcie powstają różnego rodzaju uszkodzenia, które można podzielić na:

- uszkodzenia mechaniczne – uniemożliwiające poprawną pracę rozrusznika, 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 typowo mechaniczne, w których występuje proces zużywania w wyniku tarcia, erozji oraz korozji. Proces tarcia szczotki o komutator nie jest zbyt intensywny i przy dobrych właściwościach 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 [71, 72, 131, 132, 148].

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 układu zasilania lub układu 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.

Korozja jest zjawiskiem powszechnym. Jej destrukcyjnemu działaniu, choć w różnym stopniu, ulegają wszystkie materiały i tworzywa konstrukcyjne: meta-

le i ich stopy, kompozyty, tworzywa sztuczne [93]. Korozja obejmuje wszystkie powierzchnie, części rozrusznika.

Uszkodzenia zmęczeniowe obok korozji stanowią podstawowy rodzaj uszkodzeń eksploatacyjnych rozruszników. Mechanizm, który polega na pękaniu elementów jest dobrze znany. Wyróżnia się dwie podstawowe fazy zużycia zmęczeniowego elementu maszyny [93]:

- Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego poprzez:
 - lokalne uplastycznienie materiału,
 - powstanie mikropęknięcia.
- Propagacja pęknięcia zmęczeniowego:
 - powiększenia się makropęknięcia,
 - pęknięcie elementu – całkowite zniszczenie.

Uszkodzenia tribologiczne występują w łożyskach, w których zużywają się powierzchnie tarcie.

Czas pracy łożyska do pojawienia się pierwszych oznak zmęczenia jest funkcją liczby obrotów i wielkości obciążenia łożyska. Trwałość łożyska jest definiowana liczbą obrotów, zanim pojawią się pierwsze oznaki zmęczenia i zużycia powierzchni. Wykruszenia i inne rodzaje zużycia są długimi procesami i można je wykryć poprzez zwiększony hałas, poziom drgań w łożysku [93].

Najczęściej występującą przyczyną uszkodzeń kół zębatach jest niewspółosiowość. Objawia się ona przedwczesnym pittingiem na jednym z zębów. Przyczyn niewspółosiowości może być wiele [93]:

- statyczne, np. błędy montażu, produkcji, itp.,
- dynamiczne, spowodowane odkształceniami współpracujących elementów pod wpływem obciążenia lub temperatury.

Pod wpływem nacisków na powierzchniach roboczych zębów kół zębatach pojawiają się ślady pittingu jako zużycia zmęczeniowego. Z powodu zmiennych kierunków poślizgu zębów oraz zmiany miejsca nacisku na powierzchnię zęba podczas współpracy, ślady pittingu pojawiają się zwłaszcza w stopach zębów kół zębatach, zarówno napędzanych, jak i napędzających.

5.3 Analiza typowych uszkodzeń rozruszników

Wybrane niedomagania obwodu rozruchu, ich przyczyny i sposoby usuwania przedstawia tabela 5.2.

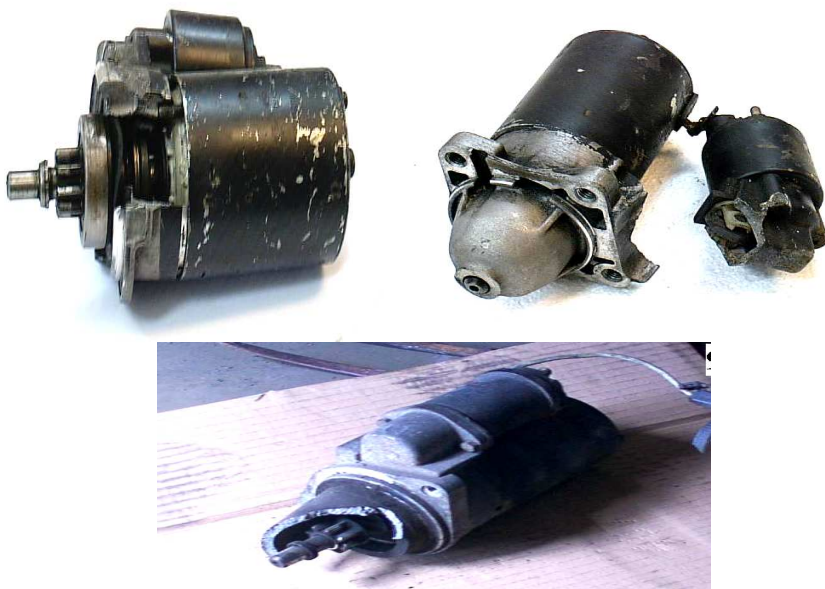
Tab. 5.2. Wybrane niedomagania obwodu rozruchu, ich przyczyny i sposoby usuwania

Objawy niedomagania	Rodzaj uszkodzenia, przyczyny	Sposoby wykrywania i usuwania uszkodzenia
rozzrusznik nie działa po zamknięciu wyłącznika rozruchowego	przerwa w obwodzie wyłącznika elektromagnetycznego	wymiana wyłącznika
	styki wyłącznika elektromagnetycznego nadpalone, zużyte lub zanieczyszczone	oczyszczenie lub wymiana styków
	brak styku szczotek z komutatorem	zużycie lub zakleszczenie szczotek
	zwarcie uzwojenia twornika lub uzwojenia szeregowego	wymiana uszkodzonych elementów
	uszkodzenie komutatora lub wirnika wskutek działania siły odśrodkowej przy zbyt wysokich obrotach	wykrycie uszkodzenia lub wymiana wirnika
zamknięcie wyłącznika rozruchowego powoduje stuki w rozruszniku	utlenione lub poluzowane połączenia w obwodzie rozruchu	oczyszczenie połączenia
	niesprawny akumulator	sprawdzenie akumulatora
	rozregulowany wyłącznik elektromagnetyczny	wyregulowanie skoku styku ruchomego i skoku rdzenia wyłącznika elektromagnetycznego
	przerwa w uzwojeniu trzymającym	wymieniana uzwojenia na nowe
wirnik rozrusznika obraca się zbyt wolno	utlenione lub poluzowane połączenia w obwodzie rozruchu	oczyszczenie połączenia
	zużyte szczotki rozrusznika	wymiana szczotek
	przewadnica szczotki ma zwarcie do masy	usunięcie zwarcia
	zanieczyszczony lub nadpalony komutator	oczyszczenie komutatora
	zwarcie w uzwojeniu twornika lub uzwojeniu szeregowym	wymiana uszkodzonego elementu
wirnik rozrusznika obraca się, koło zamachowe jest nieruchome	uszkodzona dźwignia wyłączająca	usunięcie niesprawności
	poślizg sprzęgła jednokierunkowego	wymiana uszkodzonego elementu
	zużyte zęby zębniaka lub wieńca koła zamachowego	wymiana zębniaka lub wieńca koła zamachowego
nadmierna hałaśliwość rozrusznika w czasie włączania lub w czasie pracy	rozzrusznik o włączaniu dwustopniowym włącza się jednostopniowo	usunięcie przyczyny niewłaściwego działania zapadki blokującej ruch styku ruchomego wyłącznika sterującego
	ocieranie wirnika o nabiegunniki	wymiana zużytych tulejek łożysk
	opóźnione wyłączanie zębniaka z wieńca koła zamachowego	zatarta dźwignia wyłączająca, osłabiona sprężyna tulei prowadzącej lub zatarty rdzeń elektromagnesu
	niewłaściwe zamocowanie rozrusznika	właściwe umocowanie rozrusznika
zębniak rozrusznika wyziewia się z wieńca koła zamachowego z opóźnieniem	dźwignia wyłączająca zaciera się, uszkodzona sprężyna rdzenia elektromagnesu, zatarty rdzeń elektromagnesu	wymiana uszkodzonych części
	zatarta tuleja zespołu sprzęgającego lub uszkodzona sprężyna powrotu tulei	

Analizę objawów typowych niesprawności opracowano na podstawie zebranych informacji o uszkodzeniach i eksploatacyjnym zużyciu elementów układu rozruchowego.

Na rysunkach od 5.9 do 5.28 przedstawiono wybrane uszkodzenia rozruszników:

- Głowicy rozruszników w postaci pęknięcia (rys. 5.9);
- Głowicy rozrusznika w postaci wyłamania i pęknięcia (rys. 5.10);
- Mechaniczne i elektryczne uszkodzenia wirników (rys. 5.11);
- Uzwojenia wirnika (odłączenie komutatora oraz przegrzanie uzwojenia wirnika) (rys. 5.12);
- Wycinków komutatora (rys. 5.13);
- Wirnika w postaci skorodowania (rys. 5.14);
- Mechaniczne szczotkotrzymacze (rys. 5.15);
- Zużycie szczotek (rys. 5.16);
- Stojana w postaci przegrzania uzwojenia (rys. 5.17);
- Mechanizmu sprzęgającego – typowe zużycie zębników (rys. 5.18);
- Mechanizmu sprzęgającego – zużycie zębów (rys. 5.19);
- Mechanizmu sprzęgającego – zużycie zębniaka (rys. 5.20);
- Typowe uszkodzenia przekładni planetarnej (rys. 5.21);
- Przekładni planetarnej w postaci uszkodzenia koła słonecznego i satelit (rys. 5.22);
- Przekładni planetarnej przez zatarcie mechanizmu sprzęgającego wałka przekładni (rys. 5.23);
- Zużycie eksploatacyjne dźwigienek (rys. 5.24);
- Styków wyłącznika: korozja styków, wypalenie styku, pęknięcie kopułki (rys. 5.25);
- Styków wyłącznika: wyłamanie styku, nadpalenie styków (rys. 5.26);
- Rodzaje uszkodzeń zwory wyłącznika elektromagnetycznego; wyłamanie, nadpalenie styków, nierównomierne zużycie (rys. 5.27);
- Rodzaje uszkodzeń zwory wyłącznika elektromagnetycznego: termiczne przegrzanie, wypalenie styku, minimalne zużycie styków (rys. 5.28).



Rys. 5.9. Uszkodzenia głowicy rozruszników w postaci pęknięcia



Rys. 5.10. Uszkodzenia głowicy rozrusznika w postaci wyłamania (2) i pęknięcia (5)



Rys. 5.11. Mechaniczne i elektryczne uszkodzenia wirników



Rys. 5.12. Uszkodzenia uzwojenia wirnika (odłączenie komutatora oraz przegrzanie uzwojenia wirnika)



Rys. 5.13. Uszkodzenie wycinków komutatora



Rys. 5.14. Uszkodzenie wirnika w postaci skorodowania



Rys. 5.15. Uszkodzenia mechaniczne szczotkotrzymaczy



Rys. 5.16. Zużycie szczotek



Rys. 5.17. Uszkodzenie stojana w postaci przegrzania uzwojenia



Rys. 5.18. Uszkodzenia mechanizmu sprzęgającego – typowe zużycie zębniaków



Rys. 5.19. Uszkodzenia mechanizmu sprzęgającego – zużycie zębów



Rys.5.20. Uszkodzenia mechanizmu sprzęgającego – zużycie zębniaka



Rys. 5.21. Typowe uszkodzenia przekładni planetarnej



Rys. 5.22. Uszkodzenia przekładni planetarnej w postaci uszkodzenia koła słonecznego i satelit



Rys. 5.23. Uszkodzenie przekładni planetarnej przez zatarcie mechanizmu sprzęgającego – widoczne odbarwienie wałka przekładni



Rys. 5.24. Zużycie eksploatacyjne dźwigiennik



Rys. 5.25. Uszkodzenie styków wyłącznika: korozja styków (4), wypalenie styku (5), pęknięcie kopułki (6)



Rys. 5.26. Uszkodzenie styków wyłącznika: wyłamanie styku (8), nadpalenie styków (9)



Rys. 5.27. Rodzaje uszkodzeń zwory wyłącznika elektromagnetycznego: wyłamanie (5), nadpalenie styków (6), nierównomierne zużycie (7)



Rys. 5.28. Rodzaje uszkodzeń zwory wyłącznika elektromagnetycznego: termiczne przegrzanie (8), wypalenie styku (9), minimalne zużycie styków (10)

6. Eksperymentalne badania rozruszników

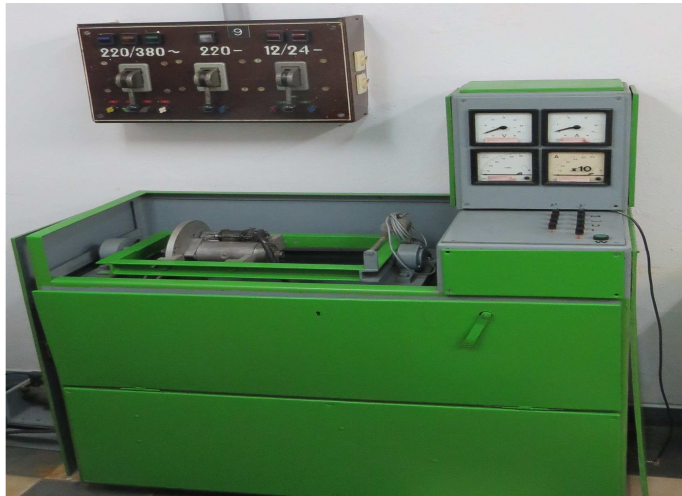
6.1. Pomiary i rejestracja wielkości elektrycznych

Na stanowisku pomiarowym (rys. 6.1) rejestracja natężenia prądu realizowana jest przez zastosowanie boczników zewnętrznych B 1500A o spadku napięcia 150 mV, w którym prąd odczytywany jest jako spadek napięcia na boczniku (rys. 6.2).

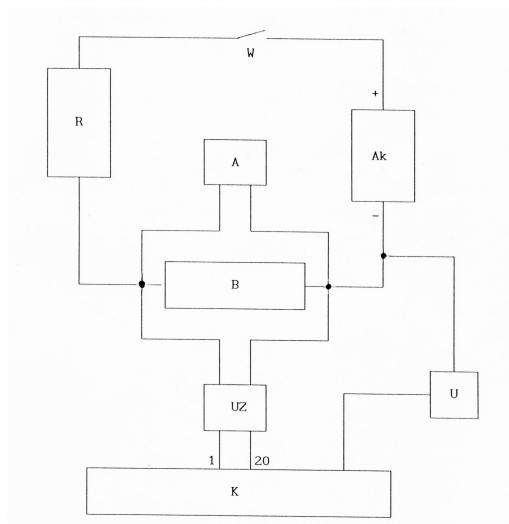
W ten sposób zasilany jest ustrój pomiarowy woltomierza magnetoelektrycznego typu M13 w celu bieżącej kontroli prądu pobieranego przez rozrusznik oraz wejście karty przetwornika analogowo -cyfrowego poprzez wzmacniacz operacyjny i układ zabezpieczający kartę przed przepięciami powyżej $\pm 10V$. Dobór elementów układu pomiarowego wynika z wielkości maksymalnego poboru prądu przez rozruszniki produkowane w kraju (1700A–1900A). Wykonany układ wymaga kalibrowania i określenia wartości pobieranego prądu jakiej odpowiada dana wartość sygnału wyjściowego.

Na stanowisku pomiar napięcia realizowany jest za pomocą woltomierza magnetoelektrycznego typu M13 o zakresie 0–40V, podłączonego do zacisków badanego rozrusznika. Zakres woltomierza obejmuje wartości napięć znamionowych rozruszników produkowanych w kraju.

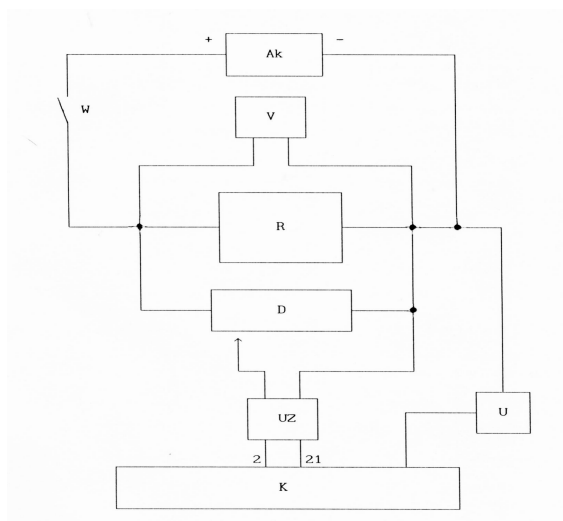
Równolegle do rozrusznika jest podłączony dzielnik napięcia D, z którego podawany jest sygnał na przetwornik analogowo-cyfrowy poprzez układ zabezpieczający przed przepięciami powyżej $\pm 10V$ (rys. 6.3).



Rys. 6.1. Stanowisko do badania rozruszników D3



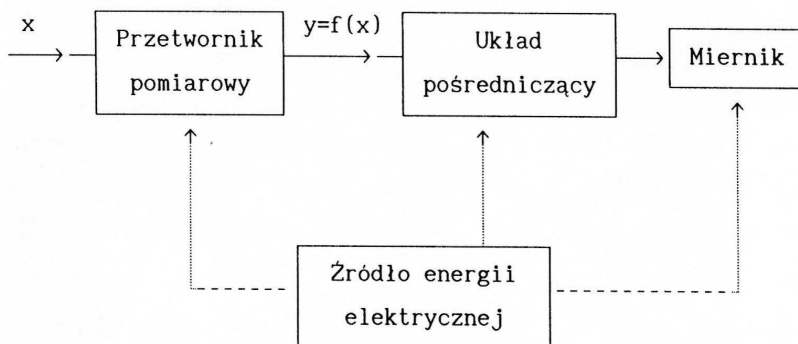
Rys. 6.2. Schemat toru pomiarowego prądu: A – amperomierz, Ak – akumulator, B – bocznik, K – komputer z przetwornikiem analogowo – cyfrowym, R – rozrusznik, U – przewód masowy, UZ – układ zabezpieczający, w – wyłącznik, 1 i 20 – numery pinów



Rys. 6.3. Schemat toru pomiarowego napięcia:
Ak – akumulator, D – dzielnik, K – komputer z przetwornikiem analogowo-cyfrowym,
R – rozrusznik, U – przewód masowy, UZ – układ zabezpieczający, V – woltomierz,
w – wyłącznik, 2 i 21 – numery pinów

6.2. Pomiary i rejestracja wielkości mechanicznych

Prędkość obrotowa rozrusznika i moment obrotowy należą do wielkości nieelektrycznych. Schemat blokowy elektrycznego układu do pomiaru wielkości nieelektrycznych przedstawia rys. 6.4.

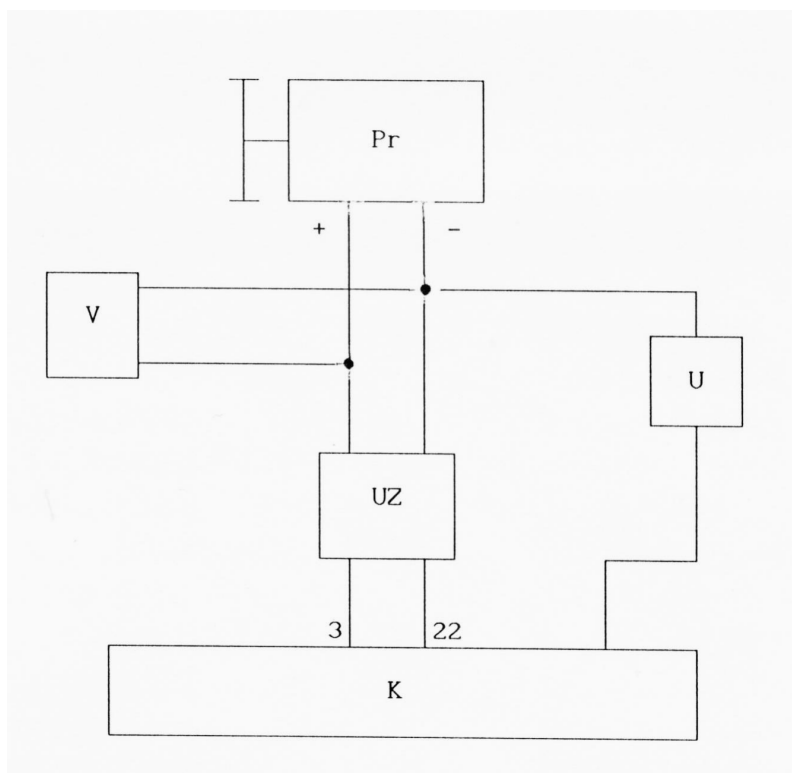


Rys. 6.4. Schemat blokowy elektrycznego układu do pomiaru wielkości nieelektrycznych

Na stanowisku badawczym pomiar prędkości obrotowej realizowany jest za pomocą prądniczki tachometrycznej prądu stałego typu PZ-32-45 o następujących danych:

1. Moc maksymalna 24W,
2. Maksymalna prędkość kątowna 50 rad/s,
3. Napięcie przy maksymalnej prędkości 300V,
4. Prąd 0,08A.

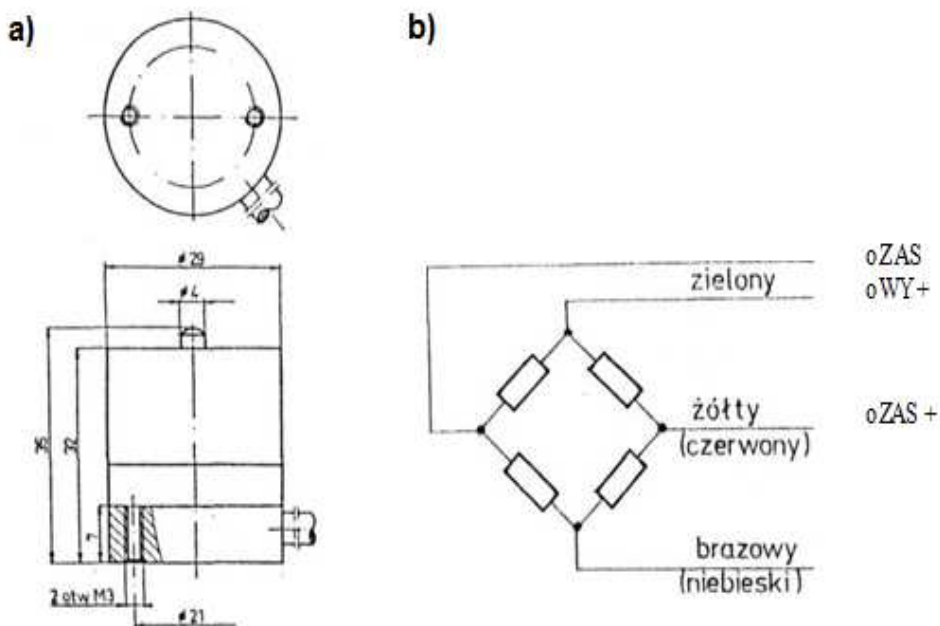
Pomiar prędkości obrotowej realizowany jest jako pomiar napięcia z prądniczki za pomocą woltomierza magnetoelektrycznego typu M13. Poprzez dzielnik obniżający napięcie do wartości poniżej 10V i układ zabezpieczający sygnał podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (rys. 6.5).



Rys. 6.5. Schemat układu pomiarowego prędkości obrotowej.

Pr – prądniczka tachometryczna, V – woltomierz, UZ – układ zabezpieczający, K – komputer z przetwornikiem analogowo cyfrowym, U – przewód masowy, 3 i 22 – numery pinów

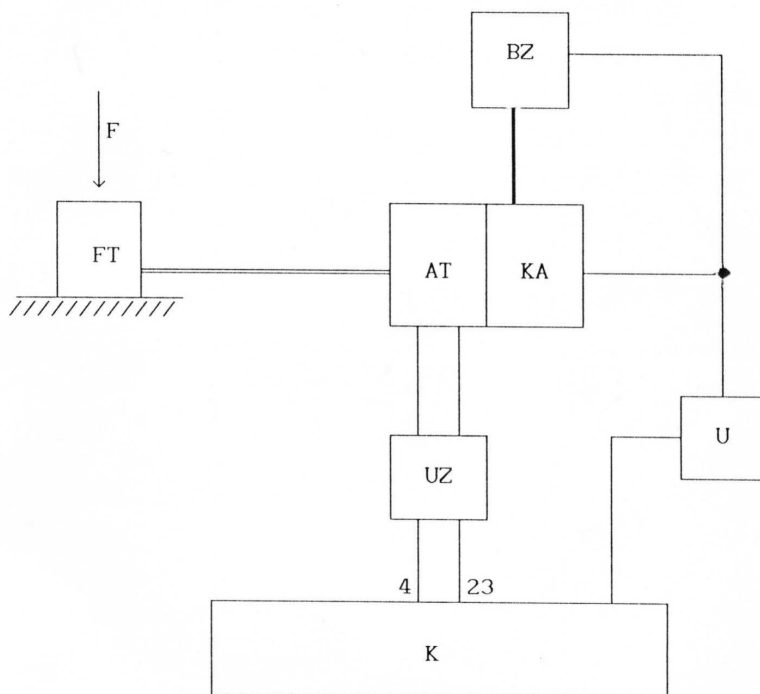
Pomiar momentu obrotowego zrealizowano wykorzystując czujnik FT-5102 (rys. 6.6). Zadaniem czujnika połączony z wzmacniaczem jest przetworzenie wartości mierzonej siły na proporcjonalną wartość sygnału elektrycznego. Siła działająca na kulkę powoduje odkształcenie pierścienia a wraz z nim naklejonych na nim tensometrów. Odkształcenie tensometrów wywołuje zmianę ich rezystancji, a przez to proporcjonalną do mierzonej siły zmianę elektrycznego sygnału wyjściowego.



Rys. 6.6. Czujnik pomiarowy siły FT – 5102 – 1/600 – SB/3mb:
 a – wygląd zewnętrzny czujnika i sposób zamocowania,
 b – schemat połączeń elektrycznych

Układ pomiarowy siły rys. 6.7 na stanowisku składa się z następujących elementów:

- czujnika siły FT-5102 między ramą obrotową, na której zamocowany jest rozrusznik, a stałym elementem konstrukcji stanowiska w odległości 50mm od osi obrotu ramy w łożyskach;
- wzmacniacza tensometrycznego AT-5102;
- komputera z przetwornikiem analogowo-cyfrowym;
- urządzeń pomocniczych (blok zasilania, układ zabezpieczający kartę pomiarową itp.).



Rys. 6.7. Schemat toru pomiarowego momentu obrotowego:
 AT – moduł" wzmacniacza mostka tensometrycznego, BZ – blok zasilania, FT – czujnik pomiarowy siły, K – komputer z przetwornikiem analogowo – cyfrowym, KA – kasetta pomiarowa, U – przewód masowy, UZ – układ zabezpieczający, 4, 23 – numery pinów

6.3. Realizacja programu badań rozrusznika na stanowisku D3

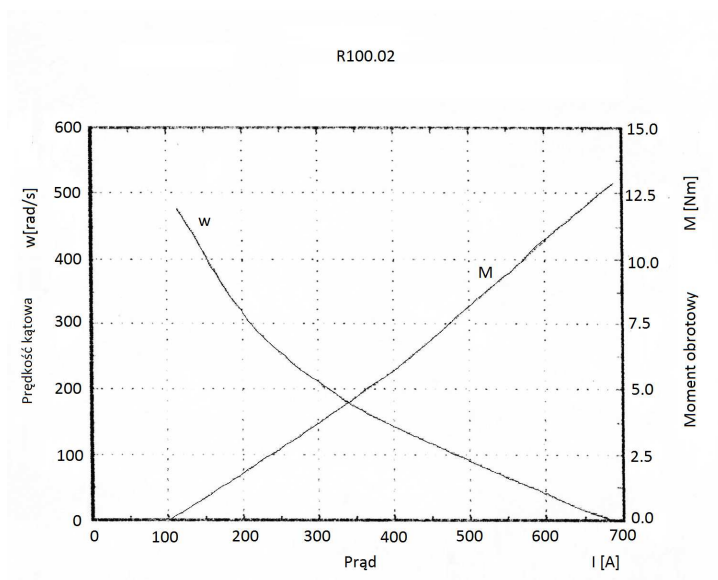
Podczas badań wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika R100.02 bez uszkodzeń oraz z trzema zasymulowanymi stanami niezdatności:

- Zwiększona rezystancja w obwodzie rozrusznika,
- Pęknięta sprężyna dociskowa szczotki masowej,
- Przerwa w uzwojeniu bocznikowym rozrusznika.

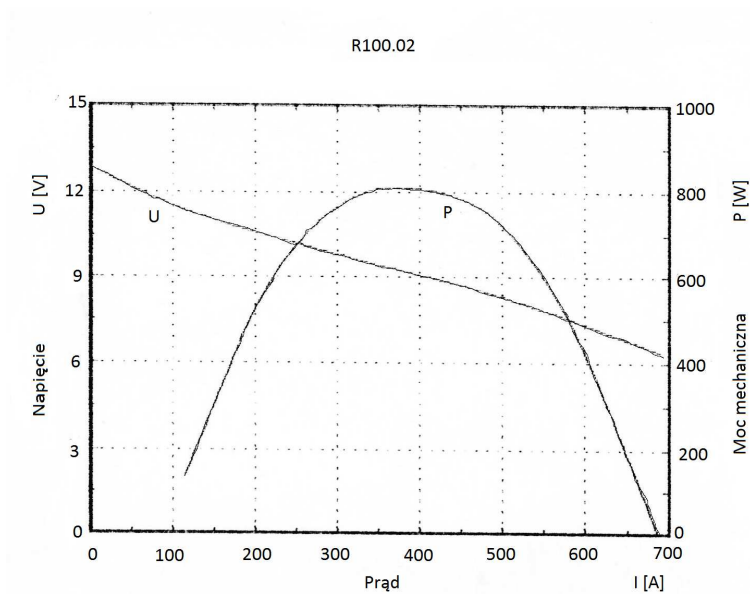
Przebiegi charakterystyk dla rozrusznika sprawnego przedstawiono na rys. 6.9 i 6.10.

Badania rozrusznika przeprowadzono na stanowisku pomiarowym posiadającym cztery tory pomiarowe dla następujących wielkości: natężenia prądu, prędkości kątownej, napięcia na rozruszniku i momentu obrotowego.

Schemat elektryczny stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 6.8.

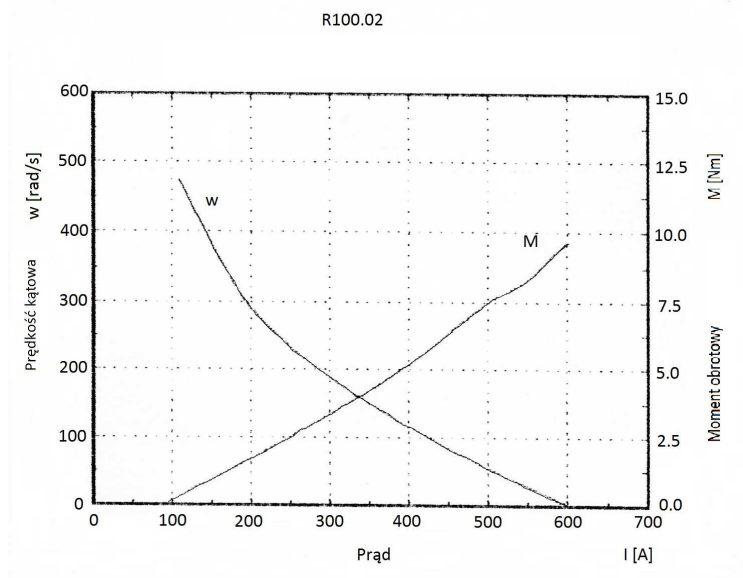


Rys. 6.9. Zależności prędkości i momentu obrotowego w funkcji prądu dla rozrusznika sprawnego



Rys. 6.10. Przebiegi napięcia i mocy mechanicznej w funkcji prądu dla rozrusznika sprawnego

Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika przy zwiększonej rezystancji w obwodzie rozrusznika przedstawiają rys. 6.11 i 6.12.

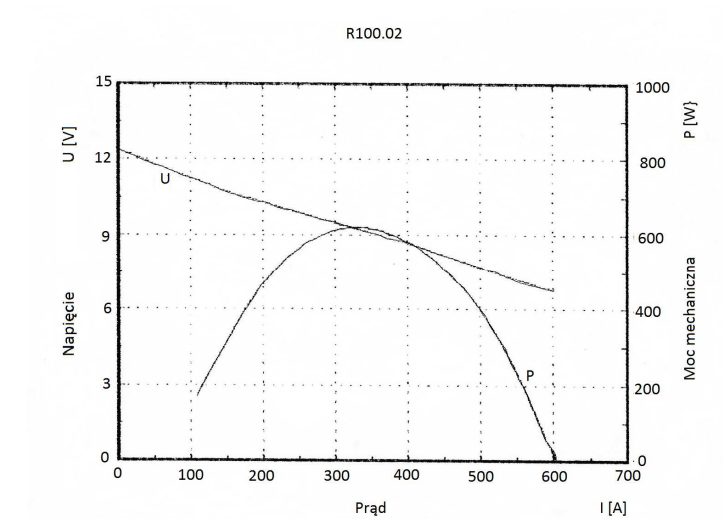


Rys. 6.11. Przebiegi $w = f(I)$ i $M = f(I)$ przy zwiększonej rezystancji w obwodzie rozrusznika

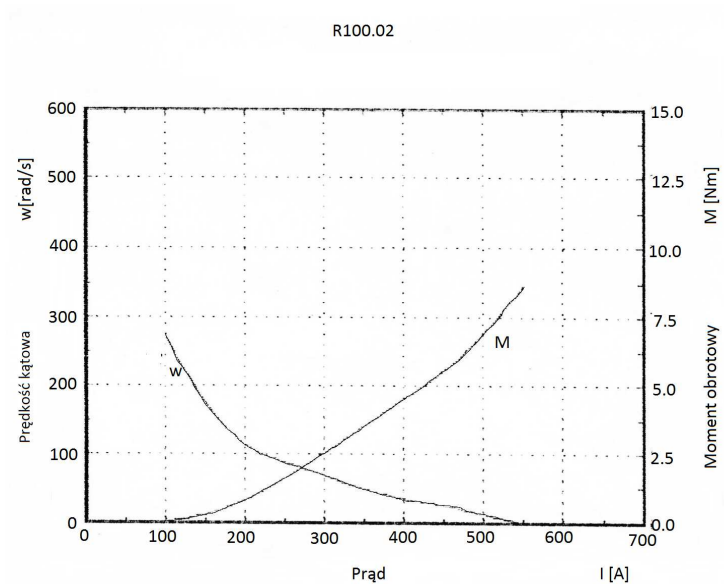
Wartość prądu zwarcia jest mniejsza niż dla sprawnego rozrusznika o 90A i wynosi 600A. Krzywa $w = f(I)$ posiada przebieg podobny do przebiegu rozrusznika sprawnego. Moment obrotowy dla pełnego zahamowania jest niższy o ponad 3Nm. Moc osiąga wartość maksymalną, równą 622W, dla prądu 330A, czyli maksimum mocy odpowiada niższej wartości prądu niż w przypadku rozrusznika sprawnego. Przebieg napięcia podczas obciążania rozrusznika w obu przypadkach jest zbliżony.

Charakterystyki elektromechaniczne dla rozrusznika z pękniętą sprężyną dociskową szczotki masowej przedstawione są na rys. 6.13 i 6.14.

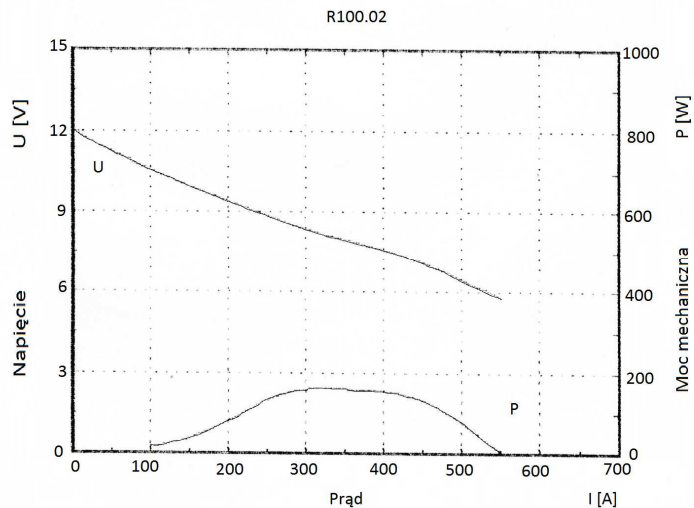
Uszkodzenie to znacznie wpływa na zmianę charakterystyk w stosunku do rozrusznika sprawnego. Prąd zwarcia osiąga wartość 550A, czyli o 140A niższą niż dla rozrusznika sprawnego. Maksymalna prędkość kątowna wynosi 280 rad/s, czyli stanowi ok. 60% prędkości rozrusznika sprawnego i maleje, a dla prądu 215A osiąga 100 rad/s. Maksymalny moment obrotowy osiąga ok. 70% wartości momentu rozrusznika sprawnego. Moc mechaniczna osiąga wartość 168W przy poborze prądu przez rozrusznik 325A. Napięcie na zaciskach rozrusznika jest o 0,6V niższe niż dla rozrusznika sprawnego. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika R100.02 z przerwanym uzwojeniem bocznikowym przedstawione 6.15.



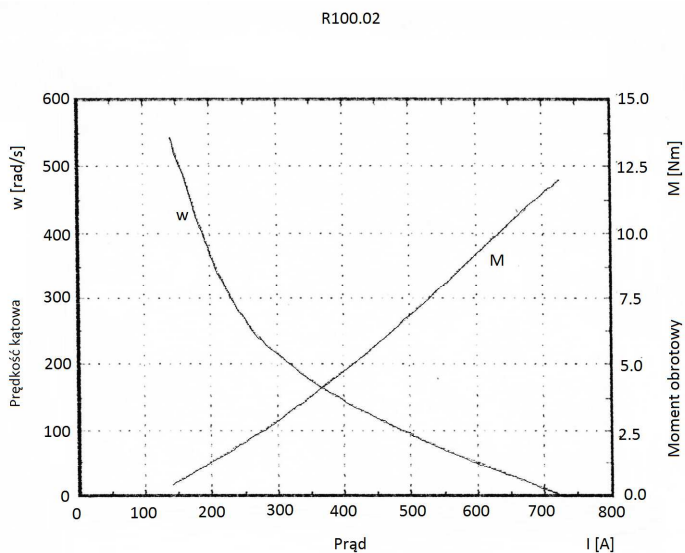
Rys. 6.12. Przebiegi $U = f(I)$ i $P = f(I)$ przy zwiększonej rezystancji w obwodzie rozrusznika



Rys. 6.13. Przebiegi $\omega = f(I)$, $M = f(I)$, dla rozrusznika z pękniętą sprężyną szczotki masowej



Rys. 6.14. Przebiegi $P = f(I)$, $U = f(I)$, dla rozrusznika z pękniętą sprężyną szczotki masowej



Rys. 6.15. Przebiegi $w = f(I)$, $M = f(I)$ dla rozrusznika z przerwą w uzwojeniu bocznikowym rozrusznika przy włączonym uzwojeniu szeregowym

Maksymalny prąd pobierany przez rozrusznik jest większy o 35A od prądu dla rozrusznika sprawnego. Prędkość kątowna biegu jałowego jest większa o ok. 15%

niż dla rozrusznika sprawnego i osiąga 564 rad/s. Wykres jest podobny do rys. 6.9 w ten sposób, że przy prądzie 250A prędkość kątowna jest taka sama jak dla rozrusznika sprawnego, a przy zwiększaniu obciążenia obniża się. Maksymalna wartość momentu obrotowego jest mniejsza o 0,9 Nm, co stanowi ok. 8% wartości momentu rozrusznika sprawnego. Maksimum mocy mechanicznej występuje dla prądu 410A i osiąga 80% wartości mocy rozrusznika sprawnego.

Wielkości zarejestrowane na stanowisku badawczym dla rozrusznika R100.02 dla różnych stanów zdadności zostały zestawione w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Rodzaj uszkodzenia: 1 – zwiększona rezystancja przewodów R_p , 2 – pęknięta sprężyna docisku szczotki masowej, 3 –przerwa w uzwojeniu bocznikowym

Rodzaj uszkodzenia	I_{min} [A]	I_{max} [A]	w_{max} [rad/s]	M_{max} [Nm]	P_{max} [W]	I_p [A]	U_{min} [V]
Sprawny	115	690	490	12.9	815	400	6.4
1	110	600	478	9.67	622	330	6.8
2	100	550	280	8.67	168	325	5.8
3	140	725	564	12.0	690	410	6.0

Na podstawie danych z tabeli 6.1 można stwierdzić, że:

- zwiększona rezystancja przewodów R_p powoduje zmniejszenie momentu obrotowego, oraz wpływa na znaczne obniżenie mocy i przesunięcie maksimum mocy w kierunku niższych prądów;
- zbyt słaby docisk szczotki (spowodowany uszkodzeniem sprężyny) wpływa na prąd zwarcia, powodując jego zmniejszenie. Charakterystyczna jest niska prędkość kątowna biegu jałowego i mała wartość momentu obrotowego pełnego zahamowania;
- przerwa w uzwojeniu bocznikowym jest przyczyną nadmiernego wzrostu prądu i prędkości kątownej biegu jałowego, oraz prądu pełnego zahamowania.

Drugą grupę badań przeprowadzono dla różnego stopnia naładowania akumulatorów. Otrzymano charakterystyki prędkości, momentu i mocy dla dwóch akumulatorów o różnym stopniu naładowania. Rejestrację przeprowadzono z wykorzystaniem techniki komputerowej:

1. Układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.8 składa się z bocznika włączonego szeregowo w obwód między akumulatorem, a rozrusznikiem. Spadek napięcia na boczniku jest proporcjonalny do wartości prądu rozrusznika. Woltomierz V wyskalowany w amperach wskazuje wartość prądu płynącego przez rozrusznik. Sygnał ten (X_i) jest jednocześnie wyprowadzony na panel zacisków PZ i oznaczony literą „I”, a następnie przez amperomierz z rejestratorem komputerowym ARK zapisywany na komputerze K3 w [mV] co 0,5s.
2. Układ pomiarowy prędkości kątowej stanowi prądniczka tachometryczna napędzana przez wieniec zębaty koła zamachowego, w obwód z którą włączony jest dzielnik napięcia D. Sygnał z dzielnika (Y_ω) jest wyprowadzony na panel zacisków PZ oznaczony literą „ ω ” i za pomocą woltomierza z rejestratorem komputerowym VRK zapisywany na komputerze K2 w [V] co 0,5s.
3. Układ pomiarowy napięcia składa się z woltomierza V_u podłączonego do zacisku 30 rozrusznika i „masy” stanowiska. Ten sam sygnał (Y_u) jest wyprowadzony na panel zacisków PZ i oznaczony literą „U”, a następnie za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego PAC zapisywany na komputerze K1 w [V] co 0,1s.
4. Układ pomiarowy momentu obrotowego składa się z czujnika siły FT umieszczonego w odległości 0,05m od osi obrotu ramy z rozrusznikiem. Sygnał z czujnika podawany jest na wzmacniacz (Y_m) i wyprowadzony na panel zacisków PZ oznaczony literą „M”, a następnie za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego PAC zapisywany na komputerze K1 w [V] co 0,1s.

Do wyznaczenia poszczególnych wielkości rozrusznika zostały wykorzystane dwa typy urządzeń służących do przetwarzania danych i umożliwiających ich rejestrację na komputerach:

- Multimetry cyfrowe firmy Brymen serii BM820 i BM520 posłużyły w badaniach jako amperomierz (do pomiaru natężenia prądu rozrusznika) oraz woltomierz (do pomiaru prędkości kątowej wirnika rozrusznika). Mierniki te wyposażone są w zestaw BU-82X składający się z kabla z wtykiem USB do komputera z adapterem optycznym od strony miernika oraz oprogramowania na płycie CD. Zestaw ten jest niezbędny do współpracy mierników z komputerem. Oprogramowanie „Data Logging System” umożliwia transmisję wyników pomiarów do komputera i wyświetlenie ich na monitorze w postaci cyfrowej i analogowej, rejestrację graficzną pomiarów. Zastosowanie multimetrów przy badaniu rozrusznika umożliwiała przetwarzanie danych analogowych napięcia pobieranego z panelu zacisków na parametry cyfrowe zapisywane na komputerze w postaci tabelarycznej w ustalonych odstępach czasu.
- Przetwornik analogowo-cyfrowy PCS10 posłużył w badaniach do pomiaru napięcia akumulatora oraz momentu obrotowego wytwarzanego przez wirnik rozrusznika. Układ rejestracji mierzonych wielkości fizycznych, wykorzystywany na stanowisku badawczym, zbudowany jest z czterokanałowego elektronicznego rejestratora napięciowego współpracującego z komputerem. Kompatybilność tych urządzeń umożliwia program Pc – Lab 2000 SE, przy pomocy którego zmienne w czasie wielkości mogą być obserwowane na ekranie komputera oraz zapisywane w postaci plików tekstowych i graficznych. w programie ustalany jest zakres poszczególnych napięć oraz częstotliwości rejestracji pomiarów. Zakres napięć zmieniany jest skokowo i może przyjmować wartości 3, 6, 15 i 30 V. Częstotliwość rejestracji od 100 pomiarów w czasie 1 s do 1 pomiaru w 10 s.

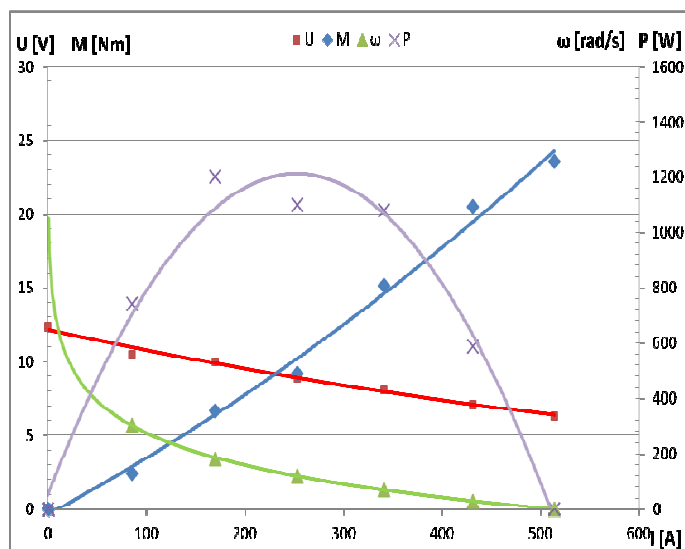
Rejestracje przebiegów poszczególnych sygnałów przeprowadzono dla wyznaczenia następujących charakterystyk rozrusznika:

- akumulator nr 1 – 85% stan naładowania (test nr 2);
- akumulator nr 1 – 65% stan naładowania (test nr 3), rys. 6.16;
- akumulator nr 1 – 50% stan naładowania (test nr 4), rys. 6.17;
- akumulator nr 1 – 35% stan naładowania (test nr 5), rys. 6.18;
- akumulator nr 2 – 95% stan naładowania (test nr 7), rys. 6.19;
- akumulator nr 2 – 90% stan naładowania (test nr 8), rys. 6.20;
- akumulator nr 2 – 70% stan naładowania (test nr 9), rys. 6.21;
- akumulator nr 2 – 40% stan naładowania (test nr 10), rys. 6.22;
- akumulator nr 2 – 15% stan naładowania (test nr 11), rys. 6.23;

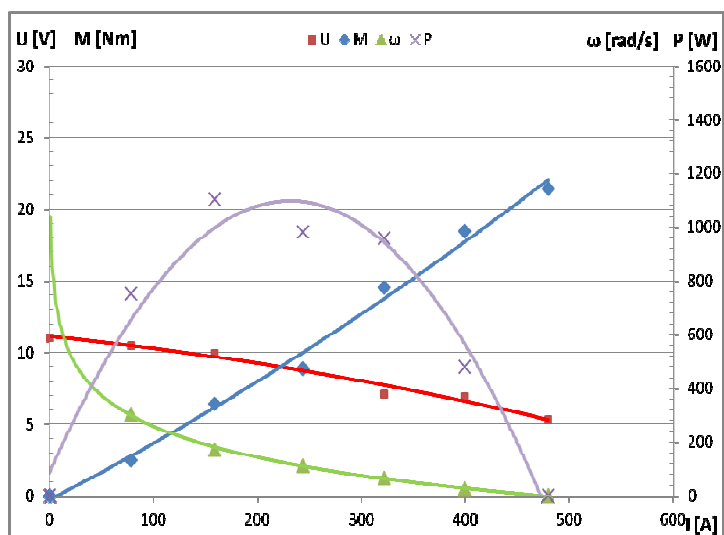
Stan naładowania akumulatorów sprawdzano testerem Bosch. Analizując charakterystyki rozrusznika sprawnego przy stanie naładowania 65% można stwierdzić, że rozrusznik osiągnął moc 1,2 kW oraz maksymalny moment 22 Nm przy prądzie 550A (rys. 6.16).

Porównując charakterystyki mocy dla akumulatora nr 1, można stwierdzić spadek mocy o 1 kW przy naładowaniu 50% oraz zmniejszenie momentu o 0,2 Nm. Z charakterystyk mocy przedstawionych na rys. 6.18 wynika zmniejszenie wartości mocy przy stanie naładowania 35% o 0,1 kW i momentu o 2 Nm.

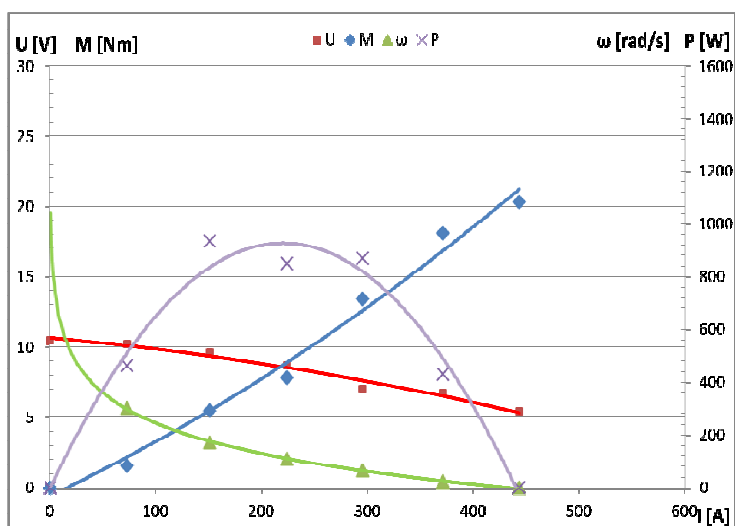
Na podstawie przebiegu mocy z rys. 6.19 wynika, że maksymalna moc jaką uzyskał rozrusznik przy 95% stanu naładowania wynosi 1,4 kW, a moment 26 Nm. Przy zmniejszaniu stanu naładowania akumulatora: 90%, 70%, 40%, 15% moc malała z 1,4 kW do 1,2 kW, 1 kW, 0,7 kW. Wyniki przedstawiono na rys. 6.20–6.23. Podobnie zmniejszeniu ulegał moment z 25 Nm do 24 Nm, 22 Nm oraz 12 Nm.



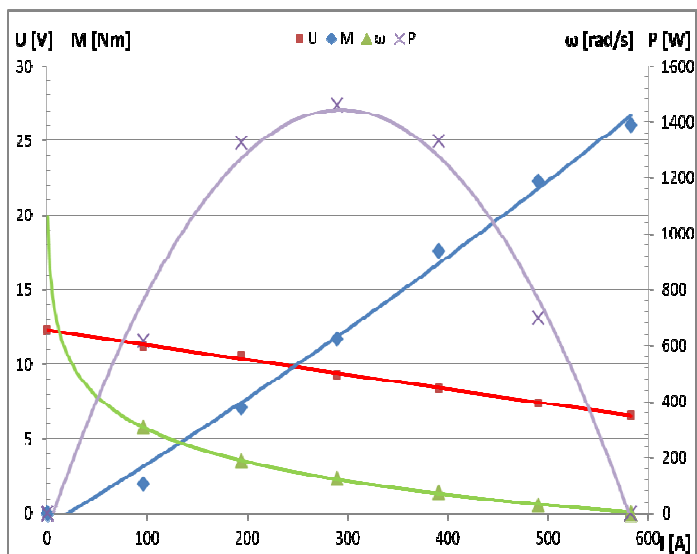
Rys. 6.16. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 1 – 65% stan naładowania (test nr 3))



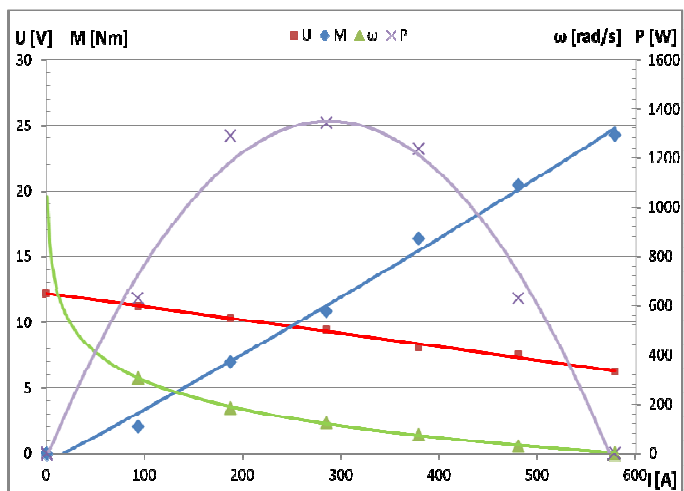
Rys. 6.17. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 1 – 50% stan naładowania (test nr 4))



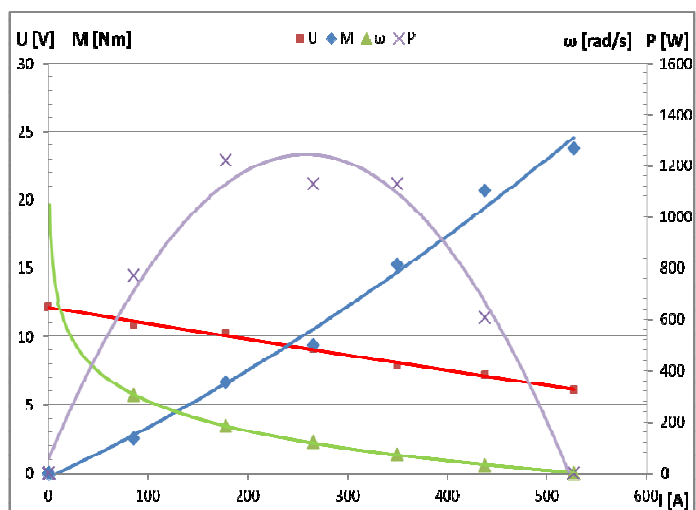
Rys. 6.18. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 1 – 35% stan naładowania (test nr 5))



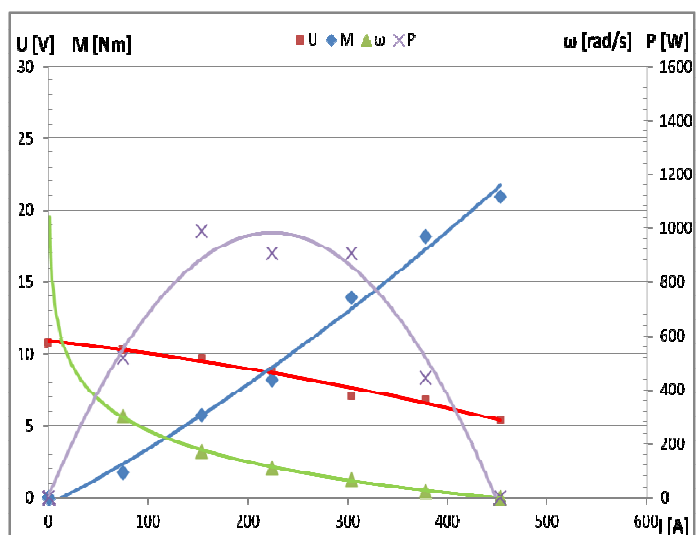
Rys. 6.19. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 2 – 95% stan naładowania (test nr 7))



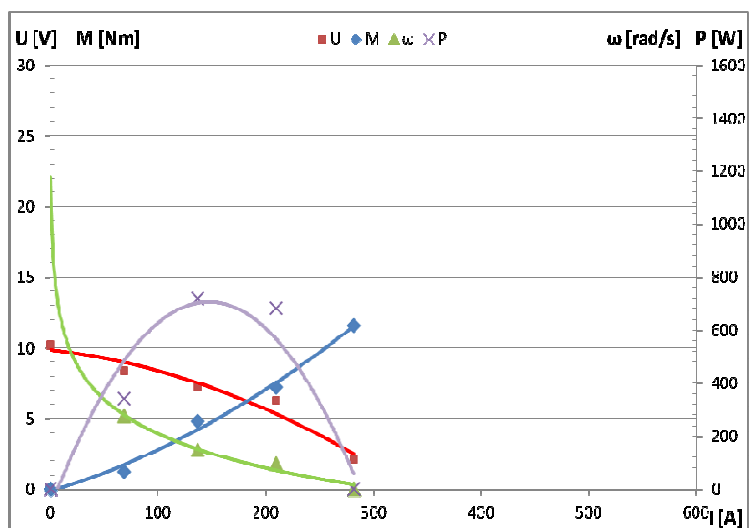
Rys. 6.20. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 2 – 90% stan naładowania (test nr 8))



Rys. 6.21. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 2 – 70% stan naładowania (test nr 9))



Rys. 6.22. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 2 – 40% stan naładowania (test nr 10))



Rys. 6.23. Charakterystyki rozrusznika (akumulator nr 2 – 15% stan naładowania (test nr 11))

7. Podsumowanie

Sformułowane cele pracy wymagały rozwiązania wielu problemów. Do najważniejszych rezultatów uzyskanych w pracy należy zaliczyć:

- dokonanie przeglądu literatury dotyczącej eksploatacji, niezawodności i diagnostyki układu rozruchowego;
- dokonanie przeglądu konstrukcji rozruszników stosowanych w środkach transportu;
- przeprowadzenie analizy modelu obwodu rozruchowego wraz z przeprowadzeniem symulacji w oparciu o model numeryczny;
- przeprowadzenie analizy eksploatacyjnego zużycia elementów układu rozruchowego na podstawie modelu oraz na podstawie eksperymentu biernego przeprowadzonego w autoryzowanych serwisach firmy Bosch, Bendiks oraz autoryzowanych serwisach poszczególnych marek pojazdów;
- opracowanie i wykonanie stanowisk badawczych umożliwiających rejestrację poszczególnych wielkości elektrycznych i mechanicznych wraz z rozkładem indukcji magnetycznej w rozruszniku;
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych, które podzielono na badanie obwodu rozruchu w fazie biegu jałowego oraz wyznaczenie charakterystyk mocy na podstawie pomiarów natężenia prądu, napięcia, prędkości obrotowej oraz momentu, co wymagało przeprowadzenia procesu hamowania rozrusznika do wyznaczenia prądu zwarcia.

Badania zostały przeprowadzone dla specjalnie wykonanych rozruszników, w których umieszczono czujniki Halla, umożliwiające rejestrację rozkładu indukcji magnetycznej: w szczelinie przytwornikowej oraz w szczelinie przyjarzmowej. Otrzymane sygnały pozwoliły identyfikować poszczególne rodzaje uszkodzeń weryfikując z rozkładem strumienia z wykorzystaniem programu QuickField.

Drugą grupę badań zrealizowano rejestrując prąd rozruchu na oryginalnych stanowiskach silnikowych opracowanych przez autora z wykorzystaniem aparatury firmy Bosch do rejestracji prądu rozruchu dla zasymulowanych stanów niesprawności silnika spalinowego.

Przeprowadzona weryfikacja eksperymentalna pozwala wykorzystać otrzymane wyniki do wdrożenia w celu monitorowania układu rozruchowego, który jako jedyny w układzie OBD nie jest realizowany. W ramach pracy opracowano metody do wyznaczania charakterystyk mocy w celu komputerowej diagnostyki rozrusznika oraz opracowano metodę wyznaczania momentu oporowego silnika spalinowego z zastosowaniem czujnika Halla.

W rozdziale dodatek zestawiono stanowiska badawcze na których prowadzone były badania weryfikacyjne. Stanowiska umożliwiają wyznaczenie charakterystyk mocy oraz rejestrację następujących wielkości: napięcia, prądu, prędkości obrotowej, momentu obrotowego rozrusznika, wyznaczenia mocy mechanicznej i elektrycznej oraz rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie

przytwornikowej dla hallotronu naklejonego na wirniku, na stojanie oraz w szczelinie przyjarzmowej do których należą:

1. Stanowisko ELKON SUPER 3 (rys. 1),
2. Stanowisko TS 1800 (rys. 2),
3. Stanowisko firmy Bosch (rys. 3),
4. Stanowisko firmy Bosch (rys. 4),
5. Stanowisko D3 opracowane przez autora (rys. 5),
6. Stanowisko D5 opracowane przez autora (rys. 6),
7. Stanowisko D1 opracowane przez autora (rys. 7),
8. Stanowisko D4 opracowane przez autora (rys. 8),
9. Stanowisko D2 opracowane przez autora (rys. 9),
10. Stanowisko badawcze silników szeregowych (rys. 10).

Drugą grupę stanowią stanowiska do rejestracji prądu rozruchu w różnych warunkach termicznych z możliwością symulacji nieszczelności dla wybranych cylindrów silników spalinowych z zapłonem iskrowym zasilanych układem wtryskowym jedno i wielopunktowym oraz silników z zapłonem samoczynnym. Rejestracje poszczególnych wielkości napięcia oraz prądu w fazie rozruchu realizowano wykorzystując trzy zestawy diagnostyczne Boscha: MOT 150, MOT 240 oraz FSA 740. W dodatku zestawiono stanowiska do rejestracji prądu rozruchu następujących silników spalinowych:

1. Silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym (rys. 11);
2. Silnika Fiat 1500 (rys. 12);
3. Silnika Focus (rys. 13);
4. Sterownia stanowiska do badania układu rozruchu silnika Focus (rys. 14);
5. Silnika BMW, wtrysk wielopunktowy Bosch Motronic M 3.2 (rys. 15);
6. Silnika Fiat Bravo (rys. 16);
7. Silnika Opel, wtrysk wielopunktowy Bosch ML 4.1 (rys. 17);
8. Silnika Toyota (rys. 18);
9. Silnika Fiat, wtrysk jednopunktowy Bosch MA 1.7 (rys. 19);
10. Silnika Opel, wtrysk jednopunktowy Multec (rys. 20);
11. Silnika ZS, CR (rys. 21);
12. Silnika Fiat Seicento, wtrysk Magneti Marelli (rys. 22);
13. Silnika Opel, wtrysk wielopunktowy Multec (rys. 23);
14. Silnika Fiat, wtrysk Multec, LPG (rys. 24);
15. Silnika Renault, wtrysk jednopunktowy Bosch Mono-Jetronic (rys. 25);
16. Silnika Mitsubishi (rys. 26);
17. Silnika Forda Focusa (rys. 27).

Literatura

1. Adamkiewicz W., Hempel L., *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*, WKiŁ, Warszawa 1983.
2. 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.
3. 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.
4. 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., 22(2) Gazi 2007”, s. 363–374.
5. 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.
6. Bayir R., Bay O., *Serial wound starter motor faults diagnosis using artificial neural network*, „Proceeding of the International Conference on Mechatronics, Istanbul, Turkey”, 3–5 June, 2004, s. 194–199.
7. 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.
8. 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”, (41), 6, 2011, s. 1262–1267.
9. Blaga 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.
10. Bolkowski S., *Elektrotechnika*, WSiP, 2005.
11. Borowik L., *Diagnostyka urządzeń elektrycznych i procesów – wybrane problemy i metody*, Wydawnictwo Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2015.
12. Borsuk W., *Przebiegi elektromechaniczne w rozruszniku samochodowym*, Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Warszawa, 1984.
13. Bosch, *Autoelektrik, Autoelektronik*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 1998.
14. Bosch, *Pkw-Starter mit Permanentfeld Dm*, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 1987.

15. Burcan J., Siczek K., *Zmiana warunków eksploatacyjnych łożysk ślizgowych rozrusznika po przeprowadzeniu naprawy*, „Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych”, Łódź 12–14 maja 1999 r., s. 145–151.
16. Burcan J., Siczek K., *Trwałość i niezawodność łożysk rozrusznika*, „Tribologia”, nr 4, 2003, s. 69–78.
17. Burcan J., Siczek K., *Wyznaczanie zużyciowych charakterystyk łożysk rozrusznika*, „Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych”, Łódź 15–16 maja 1997 r., s. 16–20.
18. Chedot L., Friedrich G., *A dynamic model for interior permanent magnet synchronous machine Application to a starter-generator*, „Industry Applications Conference, 2004”, 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE 3–7 Oct. 2004, vol. 1.
19. Chedot L., Friedrich G., *Optimal control of interior permanent magnet synchronous integrated starter-generator*, EPE, Toulouse, 2003.
20. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza parametrów elektomechanicznych rozrusznika samochodowego z silnikiem bezszczotkowym*, „Politechnika Wrocławska, Studia i Materiały”, nr 27, 2007, s. 1–10.
21. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza polowo-obwodowa rozrusznika samochodowego o magnesach trwałych*, „Politechnika Wrocławska, Studia i Materiały”, nr 30, 2010, s. 70–81.
22. Ciurys M., Dudzikowski I., *Analiza parametrów rozrusznika samochodowego z silnikiem BLDC*, „Zeszyty problemowe, Maszyny elektryczne”, nr 88, 2010, s. 19–24.
23. Ciurys M., Dudzikowski I., *Rozrusznik samochodowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, „Elektrotechnika i elektronika”, t. 24, z. 2, 2006, s. 129–132.
24. Cygan Z., Ziemia S., *Modelowanie i symulacja systemów eksploatacji maszyn*, PWN, 1987.
25. Cypko J., Cypko E., *Podstawy technologii i organizacji naprawy pojazdów mechanicznych*, WKŁ, Warszawa 1989.
26. Dąbrowski M., Kowalczyk S., Trawiński G., *Diagnostyka pojazdów samochodowych*, WSiP, Warszawa 2013.
27. Dąbrowski T., *Badanie i wnioskowanie diagnostyczne. Wybrane zagadnienia*, WAT, Warszawa 2013.
28. Drabarek J., *Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce urządzeń elektrycznych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011.
29. Drożdziel P., *Wpływ organizacji pracy samochodu na warunki rozruchu silnika spalinowego*, „Eksploatacja i Niezawodność”, nr 1, 2008, s. 72–74.
30. Drożdziel P., *Wybrane parametry pracy i rozruchu silnika spalinowego jako elementy kryterium oceny systemu transportu samochodowego*, „Eksploatacja i Niezawodność”, nr 4, 2006, s. 6–10.

31. Drożdziel P., *Widmo rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania samochodu*, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacji, Warszawa 2009.
32. Dudzikowski I., Janiszewski S., *Analiza parametrów rozruszników samochodowych o magnesach trwałych*, „Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały”, nr 20, 2000, s. 167–174.
33. Dziubiński M., *Modelowanie i eksperymentalne badania obwodu rozruchowego w środkach transportu*, Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej, ISBN 978-83-7947-205-5, Lublin 2016.
34. 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.
35. Dziubiński M., *Aspekty niezawodności w produkcji rozrusznika samochodu, reliability in manufacturing of starter*, New ways in manufacturing technologies 2004, 7th International Scientific Conference, Prešov, 17–18.6. 2004, zborník referátov/ proceedings, Košice, Technická Univerzita v Košiciach, 2004, s. 385–390.
36. Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., *Simulation tests of the starting system*, „Poznań University of Technology Academic Journals – Electrical Engineering”, Poznań University of Technology, ISSN 1897-0737, nr 88, Poznań 2016, s. 89–100.
37. Dziubiński M., Kowal J., Pęcak M., *Badania diagnostyczne rozrusznika samochodowego z wykorzystaniem zjawiska Halla*, Badania symulacyjne w technice samochodowej, Komisja Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Lublin 1995, s. 73–78.
38. 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.
39. 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.
40. Dziubiński M., Krasowski E., Plizga K., *Koncepcja wykorzystania zjawiska Halla do prognozowania niezawodności obwodu rozruchu*, Międzynarodowa Konferencja Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa MOTROL 2003, Kijów, s. 41–48.
41. Dziubiński M., Krasowski E.: Plizga K., *Metody rozpoznawania uszkodzeń rozruszników samochodowych*, „32 Zimowa Szkoła Niezawodności Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń”, Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Szczyrk 2005, s. 106–117.

42. Dziubiński M., Ocioszyński J., Walusiak S., *Elektrotechnika i elektronika samochodowa*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1999.
43. 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.
44. Dziubiński M., *Reliability and maintenance of starters*, „Problemi Tehniki – Naukowo Wirobniczyj Žurnal”, Odeski Nacionalnyj Morskji Universitet, nr 2, Odessa 2004, s. 202–209.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Ebrahimi E., Mollazade K., *Intelligent fault classification of a tractor starter motor using vibration monitoring and adaptive neuro-fuzzy inference system*, vol. 52, no. 10, October 2010, s. 561–566.
49. 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.
50. 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.
51. Forgez Ch., Loron E., Plasse S., *Temperature supervision of an integrated starter generator*, „Industry Applications Conference”, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, vol. 3, 8–12 Oct. 2006, s. 1613–1619.
52. 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”, 2006, International Federation of Automatic Control, 2006.
53. 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.
54. 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.

55. 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.
56. 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.
57. Fuvesi V., Kovacs E., *Modeling loaded starter motor with neural network*, „International Symposium on Computational Intelligence and Informatics”, 21–22 Nov., Budapest 2011, IEEE 2011, s. 551–554.
58. Gad S., Słoń G., *Wspomagana komputerowo metoda doboru obwodu rozruchowego*, „VI Konferencja Naukowo-Techniczna Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice”, Poznań 23–25 kwiecień 2001, s. 607–610.
59. Gad S., Jestriebow A., Laskowski M., Słoń G., Zawadzki A. *Symptomowe modele diagnozowania samochodowych urządzeń elektrycznych*, „Materiały 5 Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów DIAG 2003”, Ustron 2003, s. 323–324.
60. Gad S., Pawlak M., *Sztuczne sieci neuronowe w diagnostyce samochodowych urządzeń elektrycznych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 7–8/2004, s. 693–697.
61. Glinka T., Jakubiec M., *Silniki elektryczne z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku*, „Zeszyty problemowe. Maszyny elektryczne”, nr 71, 2005, s. 103–112.
62. Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, 2007.
63. Hajek V., Vitek O., Kuchynkova H., *New type of axial starter*, „Zeszyty problemowe. Maszyny elektryczne”, nr 87, 2010, s. 59–62.
64. Hajek V., Vitek O., Kuchynkova H., *Starter unique conception*, „Zeszyty problemowe. Maszyny elektryczne”, nr 86, 2010, s. 159–162.
65. Hebda M., Janicki D., *Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji*, WKŁ, 1977.
66. Hebda M., Mazur T., *Podstawy eksploatacji pojazdów samochodowych*, WKŁ, 1980.
67. Hebda M., *Eksploatacja samochodów*, Instytut Technologii i Eksploatacji, Radom 2005.
68. Hebda M., Nizniński S., Pelc H., *Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych*, WKŁ, 1980.
69. Hennberger G., Bosch, *Elektrische Motorausrustung, Starter, Generator, Batterie*, Vieveg, 1990.
70. 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 2001”, 18–20 Aug 2001, IEEE, s. 838–831.

71. 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.
72. 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.
73. Isermann R., *On fuzzy logic applications for automatic control, supervision and fault diagnosis*, „IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics”, vol. 28, no. 2, 1998, s. 221–235.
74. Issermann R., *Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications*, „Annual Reviews in Control”, vol. 29, Issue 1, 2005, s. 71–75.
75. Posta J., Pavlicek R., Hladik T., *Sample rate selection for oscilloscopic diagnostics of alternator and starter*, „RES. AGR. ENG.”, vol. 48, 2002, s. 73–77.
76. Jestriebow A., Gad S., Słoń G., Laskowski M., *Rozmyto-neuronowe modele diagnozowania układów technicznych*, „Materiały VI Krajowej Konferencji Naukowo Technicznej, Diagnostyka Procesów Przemysłowych DPP 2003”, Władysławo 2003, s. 275–281.
77. 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.
78. Jestriebow A., Gad S., Słoń G., Zawadzki. A., Laskowski M., *Analiza rozróżnialności uszkodzeń przy diagnozowaniu samochodowych urządzeń elektrycznych*; „Diagnostyka 32– Artykuły główne”, 2004, s. 135–138.
79. Józefowicz W., *Metodologia komputerowo wspomaganego systemowo ujętego projektowania maszyn elektrycznych o magnesach trwałych*, Rozprawa doktorska, Poznań, 1982.
80. Jurca F., Martins C., *Design of a permanent magnet synchronus machine for integrated starter–alternator*, „Conference: Electric Machines & Drives Conference (Universitatea Tehnica din Iasi; Electrotehnica, energetica, electronic”, 2011.
81. Jurkovic S., Strangas E., *Comparision of PMAC Machines for Starter–Generator Application in a Series Hybrid–Electric Bus*, „International Journal of Vehicular Technology”, 2011, s. 1–11.
82. K. Sawa, *The basis of commutation arc phenomena and brush commutator wear*, „Industry and Science Systems”, 2003.
83. Kim S., *Thermal Performance of Motor and Inverter in a Integrated Starter Generator System for a Hybrid Electric Vehicle*, „Energies”, no. 6 (11), 2013, s. 6102–6119.
84. Kolman R., *Zdobywanie wiedzy. Poradnik podnoszenia kwalifikacji (magisteria, doktoraty, habilitacje)*, Oficyna Wydawnicza Branta, Gdańsk 2004.
85. Kowalski B., *Badania i diagnostyka samochodowych urządzeń elektrycznych*, WKŁ, Warszawa 1981.

86. Koziej E., *Maszyny elektryczne pojazdów samochodowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
87. Labbe N., *An innovative current-limiting device for automotive micro-hybrid starter motors*, „2012 20th International Conference on Electrical Machines”, IEEE, 2012, s. 1935–1940.
88. 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.
89. Legutko S., *Podstawy eksploatacji maszyn*, Wydawnictwo WSiP, Wydanie drugie, 2007.
90. Lewitowicz J., Kustoń K., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych, Właściwości i właściwości eksploatacyjne statku powietrznego*, t. 2, WITWL, Warszawa 2003.
91. Lewitowicz J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, Badania eksploatacyjne statków powietrznych, t. 4, WITWL, Warszawa 2007
92. Lewitowicz J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, Statek powietrzny i elementy teorii, t. 1, WITWL, Warszawa 2001.
93. Lewitowicz J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, „Systemy eksploatacji statków powietrznych”, t. 3, WITWL Warszawa 2006.
94. Lindstedt P., *Diagnostyka w systemie eksploatacji obiektów technicznych*, „Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn”, z. 13, 2006, s. 98–110.
95. 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, s. 4423–4427.
96. Martin G., *An Integrated Starter–Alternator System using Induction Machine Winding Reconfiguration*, „IEEE Future Energy Challenge”, 2007.
97. Mirahki H., Moallem M., Rahimi S., *Design optimalization of IPMSM for 42V integrated starter alternator using lumped parameter model and genetic algorithms*, „IEEE Transactions on Magnetism”, vol. 50, Issue 3, 2014.
98. 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.
99. 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.
100. Mysłowski J., *Doładowanie silników*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, ISBN 978-83-206-1964-5, Warszawa 2016.
101. Mysłowski J., *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*, WNT, Warszawa 1996.

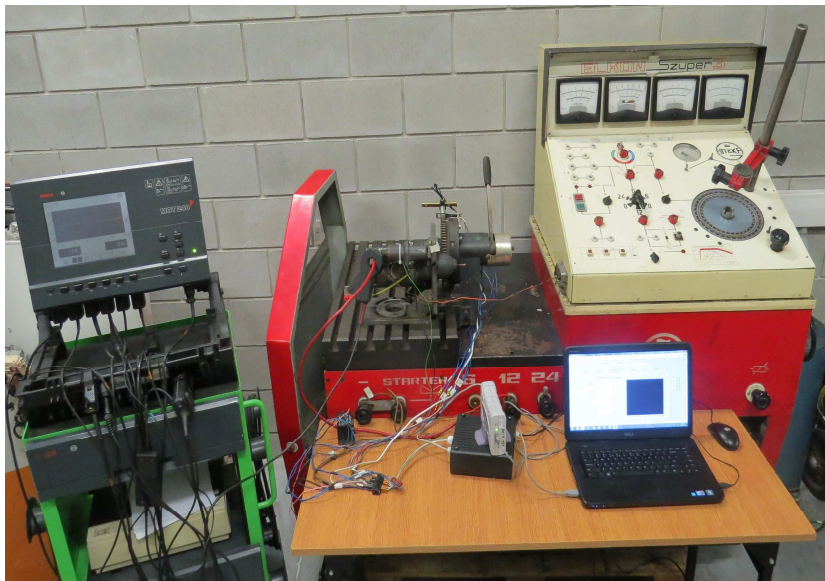
102. Mysłowski J., Uzdowski M., Kilar H., Kołtun J., *Rozruch silników z zapłonem samoczynnym w niskich temperaturach otoczenia*, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1992.
103. Nadolski R., Staszak J., Ludwinek K., Gawęcki Z., *Straty mocy w układzie napędowym bezszczotkowego silnika prądu stałego o magnesach trwałych*, „X Sympozjum Podstawowe Problemy Energetyki i Elektromechaniki”, Wisła, 7–10 grudnia, 2003, s. 17–22.
104. Nagy L., Szabo T., Jakub E., *Electro–dynamical modeling of a solenoid switch of starter motors*, „Procedia Engineering”, vol. 48, 2012, s. 445–452.
105. Nguyen H., Bartolo F., *A torque control strategy for motor starters*, The European Power Electronics Association, 1993.
106. Nikoniuk J., Krzywonos L., Pieczywek P., *Związki pomiędzy warunkami pracy pojazdu a parametrami rozruchu silnika spalinowego*, „Eksploatacja i Niezawodność”, nr 4, 2006, s. 27–31.
107. Nizniński S., Michalski R., *Diagnostyka obiektów technicznych*, Wydaw. i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji, Warszawa 2002.
108. 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.
109. Nyberg M., *Model based fault diagnosis methods, theory, and automotive engine applications*, „Linköping Studies in Science and Technology”, Dissertations No. 591, Linus & Linnea AB, Linköping, Sweden, 1999.
110. Nyberg M., *SI–Engine Air–Intake System Diagnosis by Automatic FDI–Design*, „IFAC Workshop Advances in Automotive Control”, Ohio 1998, s. 225–230.
111. Nyberg, M. Nielsen, L., *Model Based Diagnosis for the Air Intake System of the SI–Engine*, SAE Technical Paper 970209, 1997.
112. Ocioszyński J., *Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych*, WSiP, 2008.
113. Pacholski K., *Elektryczne i elektroniczne wyposażenie pojazdów samochodowych. Część 1. Wyposażenie elektryczne i elektromechaniczne*, WKŁ, Warszawa 2014.
114. Patton R., Chen J., *Design methods for robust fault diagnosis*, „Control system, Robotics and Automation”, vol. 26, 2005.
115. 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.
116. 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.

117. Plizga K., *Diagnostyka funkcjonalna obwodu rozruchu pojazdów rolniczych*, Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Lublin 2006.
118. Plizga K., *An evaluation of the technical state of a starter using the hall effect – part 2*, „Teka Kom. Mat. Energ. Rol. OL PAN”, 2009, nr 9, s. 244–250.
119. Plizga K., *Diagnostyka wyposażenia elektrycznego pojazdów rolniczych*, Motrol 2008, nr 10, s. 110–121.
120. Plizga K., *Metody diagnozowania rozruszników samochodowych* „Motrol” 2008, 10, s. 102–109.
121. Plizga K., *Model symulacyjny sygnału diagnostycznego*, „Motrol”, nr 10B, 2008, s. 207–219.
122. Pomykański Z., *Elektrotechnika samochodów*, WKŁ, 1978.
123. Pomykański Z., *Elektrotechnika samochodowa*, PWN, 1983.
124. Pomykański Z., *Laboratorium elektrotechniki samochodowej*, PWN, 1977.
125. 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.
126. Pszczółkowski J., Trawiński G., *Napędzanie wału korbowego silnika rozrusznikiem elektrycznym i pneumatycznym*, „Logistyka” nr 6, 2011, s. 3499–3508.
127. Pszczółkowski J.; *Analityczny opis charakterystyk rozrusznika elektrycznego*, „26 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silników Spalinowych Kones”, Nałęczów 2000, s. 262–271.
128. Rehman H., Liu. N., *Development and implemantation of the Visteon integrated starter–alternator system with ultracapacitors*, „16th International Electric Vehicle Symposium, Proceedings”, Beijing, Oct 12–16.1999, Conference paper, s. 1–7.
129. Reif K., *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*, 2011.
130. Saidani S., Ghariani M., *Switched Reluctance Machine For a Starter–Alternator Micro–Hybrid Car*, „Intelligent Control and Automation”, vol. 6, 2015, s. 271–288.
131. Sawa K., *Development of the lead–free brush material for the high–load starter*, „IEICE Trans. Electron.”, no. 8, August 2007, s. 1634–1642.
132. Sawa K., *Development of the lead–free carbon brush material for starters*, „IEICE Trans. Electron.”, no. 8, August 2005, s. 1675–1681.
133. Schafer H., *Optimization of the Power Train in Vehicles by Using the Integrated Starter Generator*, Expert Verlag, 2002.
134. 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.

135. 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.
136. Siczek K., *Badania trwałości ponaprawczej ślizgowych łożysk rozrusznika*, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut maszyn roboczych i pojazdów samochodowych, Poznań 2003.
137. Siczek K., *Wpływ temperatury na pracę łożysk rozrusznika*, „Archiwum motoryzacji”, vol. 7, nr. 3, 2004, s. 211–225.
138. Simani S., Fantuzzi C., Patton R., *Model based fault diagnosis in dynamics system using identification techniques*, Springer-Verlag, Spring 2002.
139. Sitek K., Syta S., *Pojazdy samochodowe. Badania stanowiskowe i diagnostyka*, WKiŁ, Warszawa 2011.
140. 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.
141. 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.
142. Szalontai L., Kovacs E., Blaga C., *Investigation of the Solenoid Switch of a Electric Starter Motor Using FEM Model*, MACRO 2010.
143. Świsulski D., *Systemy pomiarowe laboratorium*, Gdańsk 2001.
144. Taleb M., *Matlab/Simulink Models For Typical Soft Starting Means For a DC Motor*, „International Journal of Electronics&Computer Sciences”, 2011.
145. Trzeciak K., *Diagnostyka samochodów osobowych*, WKiŁ, Warszawa 2013.
146. Tutaj J., *A mathematical model of the generator starter for automotive vehicles*, „Journal of Kones Powertrain and Transport”, vol. 16, nr 1, 2009.
147. Tutaj J., *Nowe rozwiązanie samochodowego prądnico-rozrusznika*, „Journal of Kones Internal Combustion Engines”, vol. 12, 2005, s. 335–342.
148. Uecker A., *Lead-free carbon brushes for automotive starters*, „Elsevier Science. Wear”, vol. 255, no. 7, August 2003, s. 1286–1290.
149. 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.
150. Füvesi V., Kovács E., *Modelling of a starter motor with feedforward neural network*, „Proceedings of 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. EDPE 2011”, September 2011, Stará Lesná, Slovakia, ISBN 978-80-553-0734-3, s. 205–209.
151. Viorel I., Szabo L., Lowenstein L., Stet C., *Integrated starter-generators for automotive applications*, „ACTA Electrotehnica”, vol. 45, nr 3, 2004, s. 255–260.

152. 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.
153. Walusiak S., Dziubiński M., Pietrzyk W., Sumorek A., *Badania niezawodności elementów wyposażenia elektrycznego samochodów*, „Teka Komisji Naukowo-Problemovej 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.
154. Walusiak S., Dziubiński M., *Analiza uszkodzeń wyposażenia elektrycznego pojazdów samochodowych*, „Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji”, PAN w Krakowie, z. 11, 1997, s. 37–41.
155. Wang P., Lian Y., *Numerical simulation and analysis of forging process for automotive starter motor ring gear*, International Conference on System Science Engineering Design and Manufacturing Informatization, „IEEE Computer Society”, nr 2, 2010, s. 296–298.
156. Wang W., *FEA-based structure optimalization 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.
157. Wang. X., Hahn S., Jung. H., *Performance analysis and optimalization of a permanent-magnet starter motor with auxiliary poles by FEM*, „IEEE Transactions on Magnetisc”, 2003, s. 1476–1479.
158. 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.
159. Zeng S., Sun B., Tong Ch., *Zmodyfikowany model prognozowania niezawodności urządzeń elektronicznych*, „Eksploatacja i Niezawodność”, nr 4, 2009, s. 4–9.
160. Żółtowski B., Tylicki H., *Osprzęt elektryczny pojazdów mechanicznych*, „Akademia Techniczno-Rolnicza Wydział Mechaniczny”, Bydgoszcz 1999.

Dodatek



Rys. 1. Stanowisko do badań rozruszników ELKON SUPER 3



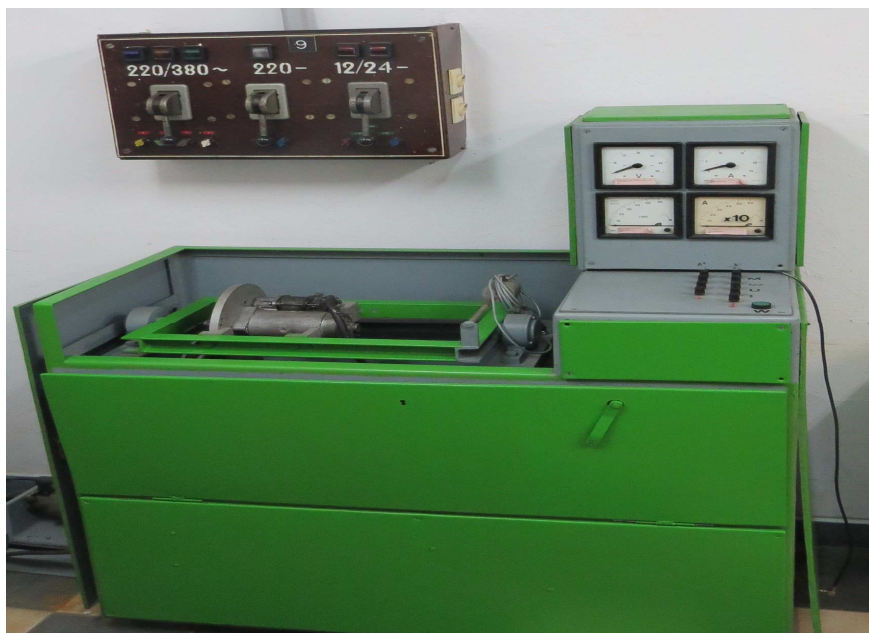
Rys. 2. Stanowisko do badań rozruszników TS 1800



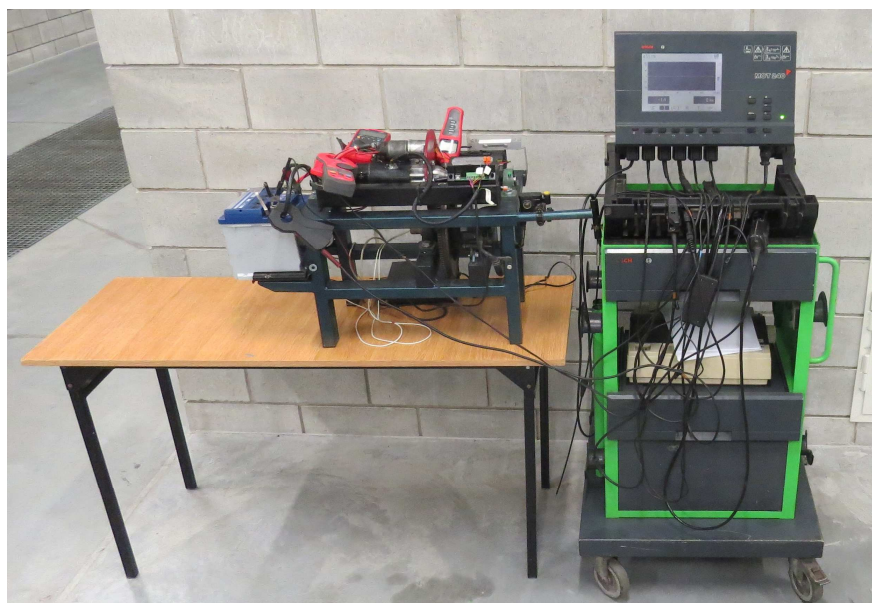
Rys. 3. Stanowisko do badań rozruszników firmy Bosch



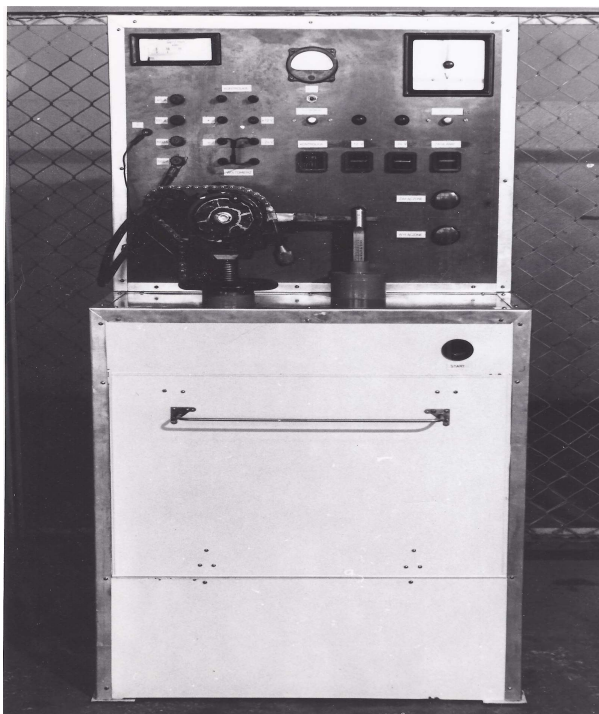
Rys. 4. Stanowisko do badań rozruszników firmy Bosch



Rys. 5. Stanowisko do badań rozruszników D3 opracowane przez autora



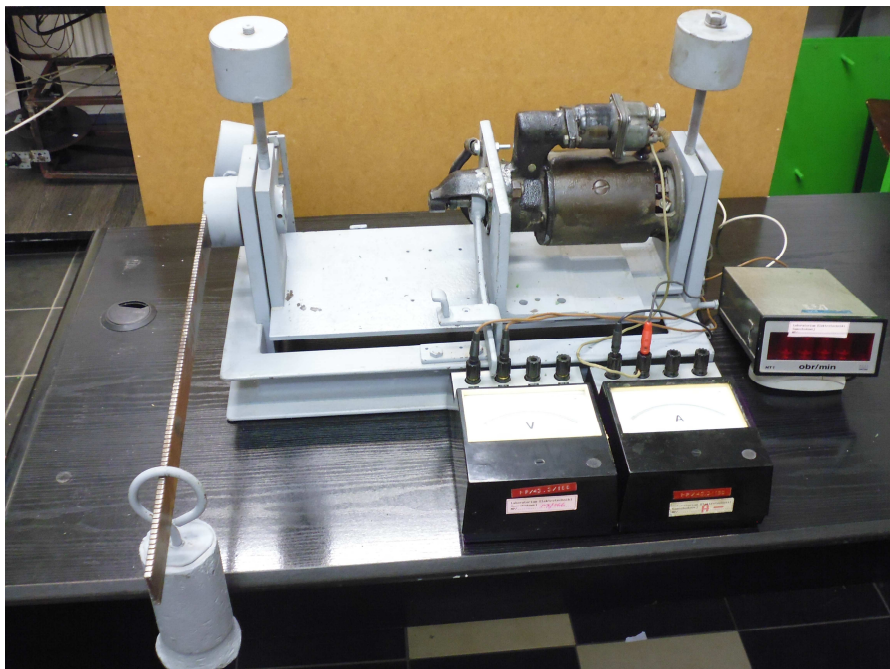
Rys. 6. Stanowisko do badań rozruszników D5 opracowane przez autora



Rys. 7. Stanowisko do badań rozruszników D1 opracowane przez autora



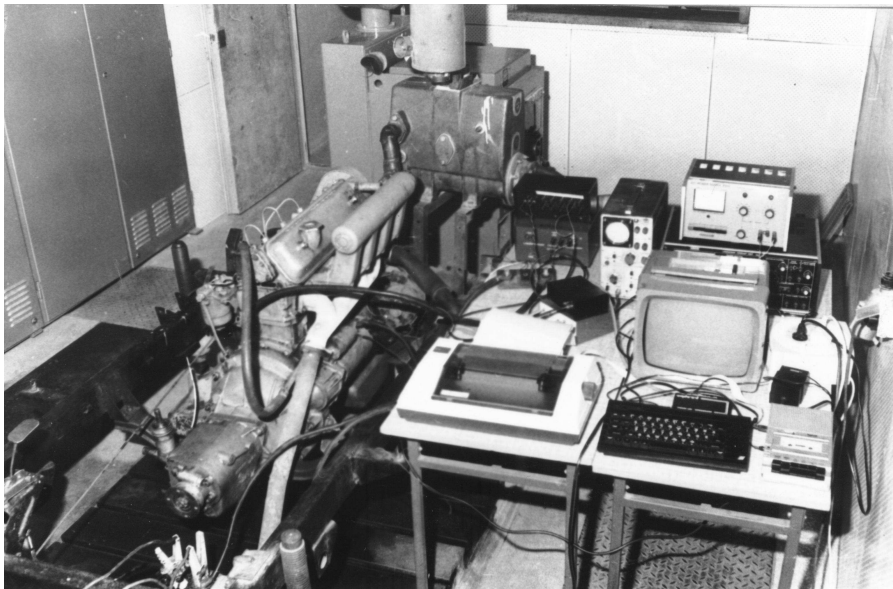
Rys. 8. Stanowisko do badań rozruszników D4 opracowane przez autora



Rys. 9. Stanowisko do badań rozruszników D2 opracowane przez autora



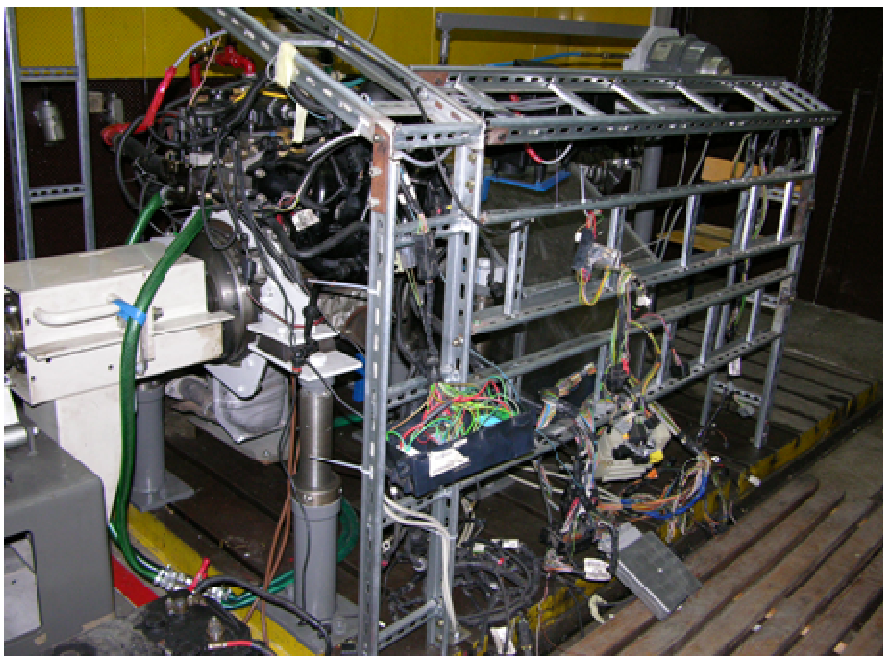
Rys. 10. Stanowisko badawcze silników szeregowych



Rys. 11. Stanowisko do badania układu rozruchu silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym



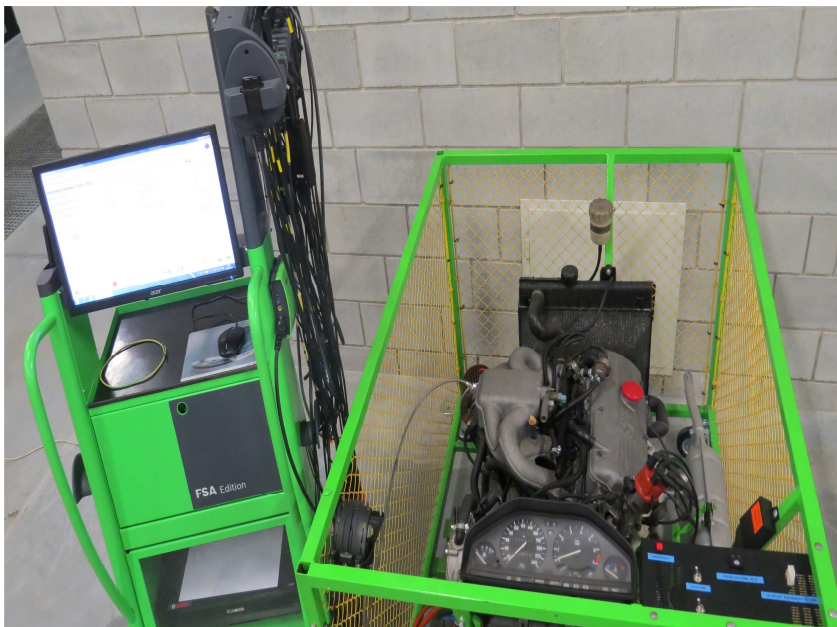
Rys. 12. Stanowisko do badania układu rozruchu silnika Fiat 1500



Rys. 13. Stanowisko do badania układu rozruchu silnika Focus



Rys. 14. Sterownia stanowiska do badania układu rozruchu silnika Focus



Rys. 15. Stanowisko badawcze z silnikiem BMW, wtrysk wielopunktowy Bosch Motronic M 3.2



Rys. 16. Stanowisko badawcze z silnikiem Fiat Bravo



Rys. 17. Stanowisko badawcze z silnikiem Opel, wtrysk wielopunktowy Bosch ML 4.1



Rys. 18. Stanowisko badawcze z silnikiem Toyota



Rys. 19. Stanowisko badawcze z silnikiem Fiat 1500, wtrysk jednopunktowy Bosch MA 1.7



Rys. 20. Stanowisko badawcze z silnikiem Opel, wtrysk jednopunktowy Multec



Rys. 21. Stanowisko badawcze z silnikiem ZS, CR



Rys. 22. Stanowisko badawcze z silnikiem Fiat Seicento, wtrysk Magneti Marelli



Rys. 23. Stanowisko badawcze z silnikiem Opel, wtrysk wielopunktowy Multec



Rys. 24. Stanowisko badawcze z silnikiem Fiat, wtrysk Multec, LPG



Rys. 25. Stanowisko badawcze z silnikiem Renault, wtrysk jednopunktowy Bosch Mono Jetronic



Rys. 26. Stanowisko badawcze z silnikiem Mitsubishi



Rys. 27. Stanowisko badawcze z silnikiem Forda Focusa