

Józef Pszczółkowski

## Badanie charakterystyk rozrusznika elektrycznego

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.158

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

*W artykule scharakteryzowano zasadę działania rozrusznika elektrycznego układu rozruchowego silnika spalinowego. Omówiono podstawowe procesy i zależności je charakteryzujące i uzasadniono charakterystyki pracy rozrusznika. Scharakteryzowano stanowisko do badań rozrusznika pozwalające na badanie jego charakterystyk i stanu technicznego przy zasilaniu za pomocą akumulatora i hamowaniu za pomocą hamulca elektrowirowego i ciernego. Stanowiska umożliwia także badanie charakterystyk pracy akumulatora w warunkach zasilania rozrusznika przy stałym jego obciążeniu. Przedstawiono wyniki badań funkcjonowania układu rozruchowego i jego elementów, akumulatora i rozrusznika w warunkach stanowiskowych i podczas napędzania wału korbowego silnika. Wskazano możliwości wykorzystania sygnałów napędzania wału korbowego jako sygnałów diagnostycznych stanu akumulatora, rozrusznika i silnika spalinowego. Omówiono sygnały rejestrowane podczas napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik.*

**Słowa kluczowe:** rozrusznik, elektryczny układ rozruchowy silnika, charakterystyki pracy rozrusznika.

### Wstęp

Rozrusznik elektryczny, pneumatyczny lub hydrauliczny jest silnikiem rozruchowym silnika spalinowego – jest to urządzenie służące do napędzania wału korbowego silnika w celu zainicjowania jego samoczynnej pracy. Możliwość samoczynnego funkcjonowania tłokowego silnika spalinowego jest skutkiem bezwładności jego mas w ruchu obrotowym. W silniku czterosurowym tylko w jednym z suwów wytwarzana jest energia ze spalania paliwa, pozostałe trzy suwy realizowane są wskutek bezwładności mas. Konieczne jest więc, aby pierwsze dwa suwy były realizowane przy zasilaniu w inny sposób niż energią samego silnika. Zadanie to początkowo spełnia rozrusznik, a jego praca nie jest konieczna po uruchomieniu silnika. Rozrusznik musi więc równoważyć moment oporu silnika spalinowego i nadać jego wałowi korbowego wymaganą do rozruchu prędkość obrotową.

Znane są trudności napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy w obniżonej temperaturze otoczenia z powodu wzrostu momentu oporu silnika, wskutek wzrostu lepkości oleju smarującego, oraz spadku mocy układu rozruchowego. Zwiększone trudności uzyskania rozruchu silnika w tych warunkach wynikają z pogorszenie warunków tworzenia mieszanki palnej i jej zapłonu. Szczególnie zatem w obniżonej wzrastają wymagania dotyczące właściwości, zasad doboru, niezawodności układu rozruchowego i utrzymania jego w stanie zdadności funkcjonalnej.

Rozrusznik elektryczny to szeregowy lub szeregowo-bocznikowy silnik prądu stałego zasilany z akumulatora kwasowego. Wyposażony jest w mechanizm włączający, pozwalający na jego połączenie z wałem korbowym silnika w czasie rozruchu za pomocą przekładni zębatej. Rozruszniki są wyposażone w urządzenia wyłączające przekładnię z chwilą uruchomienia silnika. Dużą wartość momentu napędzającego wał korbowy uzyskuje się dzięki odpowiednio dużemu przelozieniu między wałem rozrusznika i kołem zamachowym osadzonym na wale korbowym silnika. Podstawowy-

mi parametrami funkcjonalnymi charakteryzującymi układ rozruchowy są: moc znamionowa rozrusznika, pojemność akumulatora i przelozienie między wieńcem koła zamachowego i zębniem rozrusznika. Właściwości układu przedstawia się za pomocą zbioru charakterystyk obejmujących zależność momentu siły, prędkości obrotowej, mocy i napięcia na zaciskach od natężenia pobieranego prądu.

Najczęściej wytwórca rozrusznika określa wymaganą pojemność akumulatora zasilającego na podstawie jego charakterystyk. Jednym z kryteriów ograniczających dobór układu rozruchowego o odpowiednio dużej mocy dla danego silnika jest jego masa i wymiary, co jest szczególnie istotne w przypadku silników samochodów osobowych.

Aby uruchomić silnik, należy napędzać jego wał korbowy z pewną prędkością obrotową, tak aby realizowane były w jego cylindrach procesy robocze – zasilanie w paliwo i powietrze i jego sprężanie. Małe koło zębate wałka rozrusznika zazębia się z pierścieniem zębatym wokół obręczy koła zamachowego silnika. Rozrusznik wymaga dużego natężenia prądu elektrycznego, który jest włączany za pomocą włącznika – musi być włączany i wyłączany bardzo szybko, aby uniknąć szkodliwego, niebezpiecznego iskrzenia. Rozrusznik włącza i zamyka obwód elektryczny elektromagnes, zwykle przez kluczyk włącznika zapłonu. Wyłącznik zapłonu ma sprężynę powrotną, tak że zwolnienie kluczyka, wyłącza rozrusznik. Włącznik rozrusznika ma również sprężynę powrotną – zatem, gdy wyłącznik zapłonu przestaje podawać prąd do solenoidu, styki otwierają się i rozrusznik zatrzymuje się. Sprężyny powrotne powodują niezwłoczne wyłączenie rozrusznika po uruchomieniu silnika. Konieczność ta wynika stąd, że rozrusznik zużywa dużo energii elektrycznej, powodując rozładowanie akumulatora. Ponadto, napędzanie rozrusznika przez uruchomiony silnik może powodować jego poważne uszkodzenie. W związku z tym rozrusznik jest wyposażony w sprężynę jednokierunkową – urządzenie zwane przekładnią Bendixa, które sprzega zębni z pierścieniem zębatym na kole zamachowym tylko wtedy, gdy rozrusznik napędza silnik. Rozłącza się, gdy tylko prędkość silnika zwiększa się tak, że mógłby on napędzać wałek rozrusznika.

Istnieją dwa sposoby, dzięki którym można to uzyskać – system bezwładnościowy i układ wstępnie włączony. Rozrusznik typu bezwładnościowego to taki, w którym przekładnia Bendix przesuwają zębni w stronę silnika. Koło zębate nie jest sztywno przymocowane do wałka silnika elektrycznego – może się przemieszczać, jak swobodnie obracająca się nakrętka na gwincie o dużym skoku. Gdy taki rozrusznik obraca się, zębni porusza się wzdłuż gwintu i zazębia się z pierścieniem zębatym koła zamachowego. Następnie zatrzymuje się i zaczyna się obracać wraz z wałkiem, a więc napędza silnik.

Po uruchomieniu silnik obraca zębni szybciej niż jego własny wałek rozrusznika. Działanie to wkręca zębni w gwinty i powoduje zanik zazębienia. Ponieważ koło zębate powraca gwałtownie, znajdującą się na wale sprężyną, łagodzi jego uderzenie.

Gwałtowne włączenie i rozłączenie rozrusznika bezwładnościowego mogą powodować zużycie zębów przekładni. Aby ograniczyć to zjawisko, wprowadzono rozrusznik wstępnie załączony, który ma solenoid zamontowany na silniku. Solenoid powoduje również ślizganie zębni wzdłuż wału, aby go włączyć. Wał ma prosty wielo-

wypust, a nie gwint, co powoduje, że zębniak zawsze się z nim obraca.

Koło zębate przesuwane jest do zazębienia się z pierścieniem zębatym na kole zamachowym za pomocą widełek. Widełki są przemieszczane przez solenoid, który ma dwa zestawy styków. Pierwszy styk dostarcza prąd o niskim natężeniu do silnika, dzięki czemu obraca się on powoli tak, aby umożliwić zazębienie zębniaka. Przy tym operacja jest bardziej delikatna i powoduje mniejsze zużycie zębów. Następnie drugie styki zwierają się, zasilając silnik prądem o dużym natężeniu, w celu uruchomienia silnika. Silnik rozrusznika jest chroniony przed nadmierną prędkością w chwili uruchomienia silnika spalinowego za pomocą sprzęgła jednokierunkowego. Podobnie sprzężyna powrotna solenoidu wycofuje zębniak z sprzęgła.

Wszystkie elementy obwodu rozruchowego są uziemione do metalowej karoserii, zatem do przewodzenia prądu do każdego elementu funkcjonalnego potrzebny jest tylko jeden przewód.

Powyższy opis przedstawia przeznaczenie, opis manualnego operowania rozrusznikiem i objawy jego działania dostępne obserwacji zewnętrznego obserwatora. Celem artykułu jest opis zasad działania rozrusznika – generowania momentu siły i przedstawienie wyników badania jego charakterystyk na zbudowanym stanowisku. Otrzymane charakterystyki zostaną wykorzystane do opracowania procedur diagnozowania układu rozruchowego i silnika spalinowego na podstawie sygnałów rozruchu – napędzania wału korbowego.

### 1. Zasady funkcjonowania rozrusznika elektrycznego

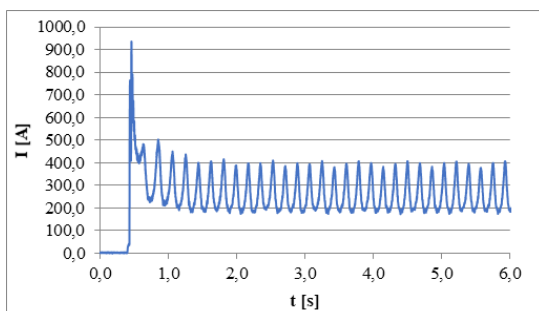
Jak zaznaczono wyżej zadaniem rozrusznika jest zrównoważenie momentu oporu silnika spalinowego i nadanie jego wałowi prędkości obrotowej w celu uruchomienia – podjęcia przez silnik samodzielnej pracy. Moment oporu silnika podczas napędzania jego wału korbowego przez rozrusznik można opisać jako sumę części stałej i zmiennej. Wartość średnia – składowa stała określana jest za pomocą formuł empirycznych typu (1):

$$M_0 = kAv^a n^b \quad (1)$$

gdzie:  $k$ ,  $a$ ,  $b$  – parametry stałe,  $A$  – parametr uwzględniający wymiary powierzchni trących silnika,  $v$  – lepkość kinematyczna oleju,  $n$  – prędkość obrotowa wału korbowego.

Składowa stała momentu oporu zależy zatem od wielkości silnika – jego pojemności skokowej (poprzez zależność parametru  $A$  od pojemności skokowej), lepkości oleju i prędkości obrotowej wału korbowego. Składowa zmienna momentu oporu silnika, podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik, zależy od ciśnienia ładunku powietrza sprężanego w cylindrach silnika.

Moment oporu silnika i zdolność akumulatora do oddawania energii warunkują wartość momentu siły wytwarzanego przez rozrusznik, którego miarą jest natężenie pobieranego prądu. Przykład przebiegu natężenia prądu podczas napędzania wału korbowego silnika AD4.236 przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika

Akumulator kwasowy jest źródłem energii zasilającym rozrusznik. Napięcie na jego zaciskach charakteryzuje zdolność akumulatora do oddawania energii. Przy danym natężeniu pobieranego prądu napięcie na zaciskach akumulatora zależy od jego pojemności znamionowej  $Q$ , temperatury elektrolitu  $T$  oraz stanu naładowania  $k$ , który określa stan techniczny źródła energii. Ogólną postać zależności napięcia na zaciskach akumulatora  $U$  od wymienionych parametrów można zapisać w postaci ogólnej (2). Zależność ta może być w szerokim zakresie zmienności, przyjęta jako funkcja liniowa.

$$U = U(Q, I, T, k) \quad (2)$$

Wytwarzanie mechanicznego momentu siły przez rozrusznik elektryczny bazuje na zjawiskach i prawach fizyki elektromagnetyzmu [1]. Przewodnik, przez który przepływa prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne o indukcji  $B$  (3), której kierunek i zwrot wyznaczyć można za pomocą reguły śruby prawoskrętnej – prawej dłoni.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3)$$

gdzie:  $\mu_0$  – jest przenikalnością magnetyczną próżni  $I$  – natężeniem prądu,  $r$  – odległością punktu od przewodnika.

Pole magnetyczne zwojnicy (inaczej solenoid, cewka), która jest układem nawiniętych, połączonych szeregowo zwojów przewodnika, charakteryzowane jest wartością indukcji magnetycznej (4).

$$B = \frac{\mu_0 n I}{l} \quad (4)$$

gdzie:  $n$  – liczba zwojów,  $l$  – długość solenoidu.

W polu magnetycznym o indukcji  $B$  na przewodnik o długości  $l$ , w którym płynie prąd o natężeniu  $I$ , w kierunku prostopadłym do kierunku indukcji i przepływu prądu działa siła elektrodynamiczna (wyrażona poprzez ich iloczyn wektorowy) (5). Z tej zależności wynika wartość momentu siły wytwarzanego przez uzwojenia rozrusznika.

$$F = I(l * B) \quad (5)$$

Magnes stały, bądź elektromagnes wytwarza strumień indukcji magnetycznej  $\Phi$ , który jest określony przez (6) iloczyn skalarny wektora indukcji magnetycznej  $B$  i pola powierzchni  $S$ , przez którą przechodzi (w kierunku prostopadłym do powierzchni).

$$\Phi = B \cdot S \quad (6)$$

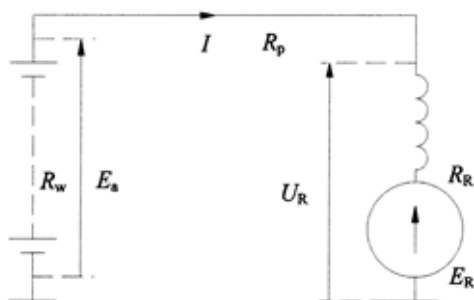
Najważniejszym zjawiskiem elektromagnetyzmu jest indukcja elektromagnetyczna – zjawisko powstawania siły elektromotorycznej w przewodniku na skutek zmian strumienia pola magnetycznego. Zmiana strumienia pola magnetycznego może wynikać z ruchu przewodnika lub źródła pola magnetycznego. Może to być np. ruch obrotowy. Zjawisko indukcji opisuje prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya (7), zgodnie z którym indukowana siła elektromotoryczna (SEM) jest pochodną względem czasu strumienia indukcji magnetycznej przepływającego przez powierzchnię objętą przewodnikiem.

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Kierunek indukowanego wskutek indukcji elektromagnetycznej prądu określa się za pomocą reguły Lenza, według której kierunek indukowanego prądu jest taki, że strumień wytworzonego pola magnetycznego przeciwdziała zmianom strumienia, dzięki któremu ten prąd powstał. Reguła ta nazywana jest także regułą przekory.

Przedstawione wyżej zależności dotyczą także funkcjonowania rozrusznika elektrycznego. Należy przy tym zaznaczyć, że zależności te dotyczą układów idealnych, np. nieskończenie długich, bądź w pełni jednorodnych. Tych warunków nie spełnia obwód elektryczny bądź magnetyczny rozrusznika. Z tego powodu do odpowiednich zależności wprowadzane są stałe współczynniki wyznaczone eksperymentalnie, np. konstrukcyjne. Taki charakter ma indukcyjność cewki  $L$ , definiowana jako stosunek wytwarzanego strumienia magnetycznego do natężenia płynącego przez nią prądu.

Rozrusznik elektryczny składa się z elektrycznego silnika prądu stałego szeregowego lub szeregowo-bocznikowego (silniki bocznikowe mają zbyt mały moment dla określonego poboru prądu) i elementu przekładniowego. Schemat elektryczny obwodu rozruszającego silnika szeregowego rozrusznika przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Schemat obwodu szeregowego silnika elektrycznego rozrusznika – wg [4]

Napięcie na zaciskach rozrusznika  $U_R$  jest równe (8):

$$U_R = E_A - I(R_w + R_p) \quad (8)$$

gdzie:  $R_p$  – rezystancja przewodów łączących akumulator i rozrusznik.

Na skutek obracania się wirnika silnika elektrycznego w uzwojeniach twornika indukuje się siła elektromotoryczna  $E_R$ , która przeciwdziała przepływowi prądu przez to uzwojenie. Wartość tej siły elektromotorycznej jest zależna od strumienia magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia, stałej konstrukcyjnej rozrusznika  $c_m$  oraz prędkości obrotowej  $n$ :

$$E_R = c_m \Phi_{wz} n \quad (9)$$

Równowagę napięć w obwodzie rozrusznika można zapisać (10):

$$E_R = U_R - \Delta U_{SZ} - IR_R \quad (10)$$

gdzie:  $\Delta U_{SZ}$  – spadek napięcia na szczotkach,  $R_R$  – rezystancja uzwojenia twornika i uzwojenia szeregowego.

Podstawiając wyrażenie na  $U_R$  (10) do (8) otrzymuje się (11):

$$E_R = E_A - \Delta U_{SZ} - I(R_w + R_p + R_R) \quad (11)$$

W stanie zwarcia rozrusznika (pełne zahamowanie  $n = 0$ ) siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniach twornika  $E_R = 0$ , ponieważ nie występuje zmiana strumienia magnetycznego. Wówczas natężenie prądu zwarcia wynosi (12):

$$I_Z = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{R_w + R_p + R_R} = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{R} \quad (12)$$

gdzie:  $R$  – całkowita rezystancja obwodu akumulator – rozrusznik.

Moc elektromagnetyczna rozrusznika jest iloczynem siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach twornika i natężenia prądu pobieranego przez silnik (13):

$$P_E = E_R I = (E_A - \Delta U_{SZ}) I - I^2 R \quad (13)$$

Jest ona równa zero w dwóch punktach pracy rozrusznika:

1. przy  $E_R = 0$ ,  $n = 0$ , a więc w punkcie zwarcia,
2. przy  $I = 0$ , a więc w stanie idealnego biegu jałowego.

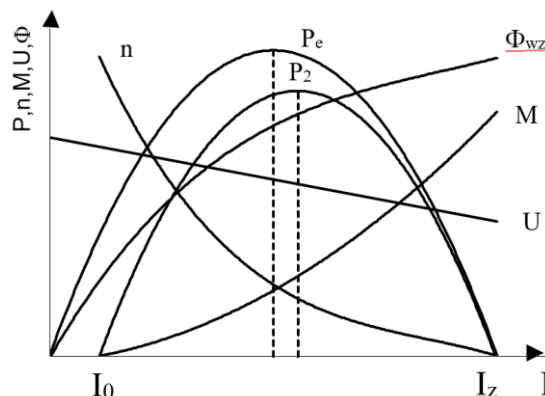
Z wyrażenia (13) wynika także, że moc maksymalna rozrusznika jest uzyskiwana przy natężeniu prądu (14):

$$I_{P_{max}} = \frac{E_A - \Delta U_{SZ}}{2R} = \frac{1}{2} I_Z \quad (14)$$

A wartość maksymalna mocy – funkcji  $P_E = f(I)$ , jest równa (15):

$$P_{E_{max}} = \frac{(E_A - \Delta U_{SZ})^2}{4R} \quad (15)$$

Moc osiągnięta na wale rozrusznika  $P_2$  jest mniejsza od jego mocy wewnętrznej, elektromagnetycznej  $P_E$  o straty mechaniczne i magnetyczne. Straty rosną ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika, wobec tego osiągają maksimum przy biegu jałowym rozrusznika. Charakterystyka mocy mechanicznej  $P_2 = f(I)$  przebiega więc poniżej charakterystyki  $P_E = f(I)$  i rozpoczyna się w punkcie określającym prąd biegu jałowego  $I_0$ . W stanie zwarcia zarówno moc elektromagnetyczna i moc na wale są równe zero, obie charakterystyki mają tutaj punkt wspólny. Schematyczny przebieg charakterystyk rozrusznika pokazano na rys. 3.



**Rys. 3.** Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika elektrycznego ( $P$  – moc rozrusznika,  $n$  – prędkość obrotowa wału rozrusznika,  $M$  – moment siły rozrusznika,  $U$  – napięcie na zaciskach,  $\Phi$  – strumień magnetyczny) – opracowanie na podstawie [4]

Moment siły (obrotowy moment elektromagnetyczny) rozrusznika powstaje jako wynik oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem i na podstawie (5), po wprowadzeniu stałych współczynników konstrukcyjnych, jest równy (16):

$$M_{em} = c_1 \Phi_{wz} I = c_1 c_2 I^2 = c I^2 \quad (16)$$

gdzie:  $\Phi_{wz}$  – strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie wzbudzenia,  $I$  – natężenie płynącego prądu,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c$  – stałe konstrukcyjne silnika.

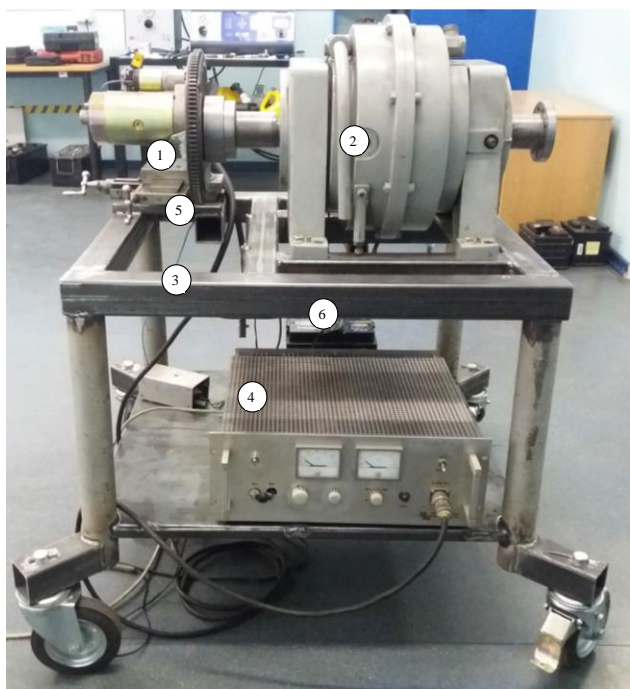
Moment obrotowy jest funkcją kwadratową natężenia prądu, jednak ze względu na nasycenie obwodu magnetycznego rozrusznika, począwszy od pewnej wartości natężenia jego przebieg ma charakter prawie liniowy. Maksimum wartości momentu siły wytworzonego przez rozrusznik zależy od jego cech konstrukcyjnych oraz



od zdolności akumulatora – źródła energii do oddawania prądu i zachowania odpowiednio wysokiej wartości napięcia na zaciskach. Charakterystyka momentu siły rozrusznika od natężenia prądu jest najważniejszą jego charakterystyką i jest korzystna dla rozruchu silnika spalinowego. Moment siły osiąga bowiem maksimum w chwili włączenia rozrusznika, gdy zębniak jest w stanie zablokowania i przez rozrusznik płynie prąd zwarcia  $I_z$ . Pozwala to na szybki wzrost prędkości obrotowej wału korbowego silnika w chwili włączenia rozrusznika. W drugiej fazie rozruchu silnika zwiększa się prędkość obrotowa wału korbowego i zmniejsza natężenie pobieranego przez rozrusznik prądu. Moment użyteczny rozrusznika jest mniejszy od momentu elektromagnetycznego o straty na tarcie, przegrzewanie stali i prądy wirowe w tworniku.

## 2. Stanowisko do badań charakterystyk rozrusznika

Dla celów badań charakterystyk rozrusznika wykonano stanowisko badawcze wyposażone w układ sprzęgający rozrusznik z hamulcem elektrowirowym. Hamulec jest sterowalnym źródłem oporu mechanicznego, w którym istnieje możliwość planowej zmiany obciążenia. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 4. Stanowisko badawcze zapewnia możliwość jego przemieszczania – rama stanowiska wykonana z profili stalowych, została wyposażona w koła o odpowiedniej nośności. Hamulec elektrowirowy, stanowiący element obciążający badany rozrusznik, przymocowano do ramy. Do ramy przymocowano także mechanizm ustalający położenie rozrusznika względem koła zamachowego. Umożliwia on prawidłową współpracę zębniaka rozrusznika z wieńcem koła. Do mechanizmu przymocowano wspornik, do którego przykręcany jest badany rozrusznik, umożliwiającą równoważenie sił i momentów sił powstających podczas pracy rozrusznika. Wspornik jest elementem wymiennym, dopasowanym do aktualnie badanego typu rozrusznika. Konieczność stosowania wymiennego wspornika, innego dla każdego badanego rozrusznika wynika ze sposobu jego mocowania do kadłuba silnika oraz parametrów mechanicznych i elektrycznych rozrusznika.



**Rys. 4.** Stanowisko do badania charakterystyk rozruszników: 1 – badany rozrusznik, 2 – hamulec elektrowirowy, 3 – rama stanowiska, 4 – sterownik hamulca, 5 – układ pozycjonowania rozrusznika, 6 – źródło energii elektrycznej – akumulator

Do wału hamulca elektrowirowego przymocowane jest koło zamachowe, na obwodzie którego znajduje się wieńiec zębaty współpracujący z zębniakiem rozrusznika. Prędkość obrotowa wału hamulca zależy od parametrów rozrusznika, źródła zasilania rozrusznika, oporów ruchu wału hamulca oraz przełożenia między zębniakiem rozrusznika i kołem zamachowym. Sterowanie hamulcem elektrowirowym realizowane jest za pomocą elektrycznego sterownika, poprzez regulację napięcia oraz natężenia prądu podawanego na uzwojenie stojana hamulca.

Hamulec elektrowirowy obciąża badany rozrusznik momentem siły powstającym w wyniku generowania prądów wirowych w obwodzie magnetycznym hamulca. Cała energia doprowadzona do hamulca jest zamieniana na ciepło odprowadzane do otoczenia. Hamulec elektrowirowy składa się z zespołu roboczego i podstawy hamulca. Najważniejszymi jego elementami są: wirnik zębaty, ułożyskowana obudowa, cewki magnetyczne. Wirnik ułożyskowany jest w obudowie zespołu roboczego. Wirnik wykonany jest w formie stalowej tarczy uzębionej na obwodzie. Nad wirnikiem znajduje się cewka elektromagnesu. Obracający się w polu magnetycznym wirnik hamulca elektrowirowego powoduje lokalne wahania indukcji magnetycznej – od stanu, gdy w określonym obszarze znajduje się ząb wirnika do stanu, gdy znajduje się w tym miejscu wręb. Zmiany lokalnych strumieni wywołują prądy wirowe w częściach obudowy hamulca, które współdziałając ze strumieniem magnetycznym są źródłem momentu hamującego. Moment hamujący stara się obrócić zespołem roboczym hamulca, który jest zamocowany obrotowo względem podstawy i podparty przetwornikiem siły, pozwala na jej pomiar. Czujnik siły jest zamocowany pomiędzy ramą, a obudową hamulca elektrowirowego za pośrednictwem ramienia. Pomiar siły obciążającej hamulec umożliwia wyznaczenie momentu obrotowego.

Stanowisko zostało wyposażone w układy rejestracji parametrów pracy akumulatora i rozrusznika: napięcia na zaciskach akumulatora  $U$  [V], natężenia pobieranego przez rozrusznik prądu  $I$  [A], prędkości obrotowej wału hamulca elektrowirowego  $n$  [obr./min]. Prędkość obrotowa może być rejestrowana przy wykorzystaniu wbudowanego w hamulec czujnika prędkości obrotowej.

Badania wstępne rozrusznika na stanowisku i wykonana na ich podstawie analiza wskazały konieczność dokonania istotnych zmian ukończenia i zasad pracy stanowiska. Z uwagi na charakterystykę pracy hamulca zamontowano dodatkowy hamulec cierny na wale hamulca elektrowirowego, zwiększający moment siły obciążenia rozrusznika. Umożliwi to badanie charakterystyk w pełnym zakresie wartości natężenia prądu pobieranego z akumulatora.

Wprowadzono następujące zmiany ukończenia stanowiska:

- zamontowanie dodatkowego hamulca ciernego na wale hamulca elektrowirowego, zwiększającego moment obciążenia rozrusznika;
- zamontowanie nowego, dedykowanego do tego stanowiska czujnika siły typu CL 14U – 5 kN;
- zamontowanie optycznego czujnika pomiaru prędkości obrotowej wraz z tarczą pomiarową zębata na wale hamulca.

Wprowadzone zmiany umożliwiły dostosowanie torów pomiarowych do współpracy z systemem rejestracji sygnałów rozruchu stosowanym podczas badań akumulatorów i badań rozruchowych silników w komorze niskiej temperatury. Pozwoliło to na zastosowanie jednego uniwersalnego systemu rejestracji sygnałów dla wszystkich obszarów i obiektów badań: akumulatorów, rozruszników i silnika oraz jednolitego systemu i oprogramowania sterującego realizacją pomiarów oraz wstępnym przetwarzaniem ich wyników.

ków. Bardziej zaawansowane przetwarzanie wyników jest możliwe przy zastosowaniu arkusza kalkulacyjnego.

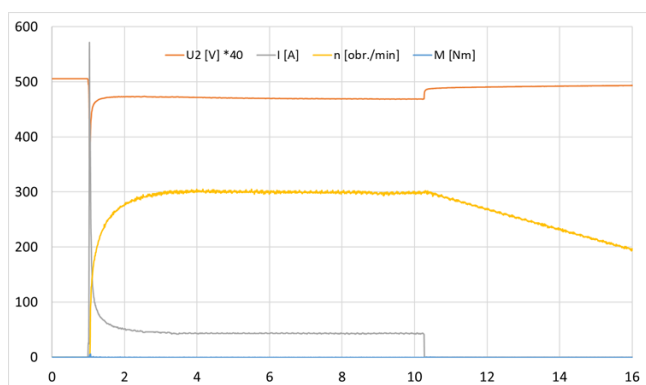
Po przygotowaniu i pełnym ukończeniu tego stanowiska możliwe było wyznaczenie charakterystyk elektrycznych i mechanicznych układu rozruchowego: momentu siły rozrusznika, prędkości obrotowej i napięcia źródła zasilania w zależności od natężenia pobieranego prądu. Badania charakterystyk rozrusznika i zasilającego go akumulatora pozwalają na weryfikację wyników badań akumulatorów w warunkach rozładowania stanowiskowego. Wyznaczone charakterystyki rozrusznika pozwolą na ocenę warunków pracy układu rozruchowego podczas badań rozruchu silnika.

### 3. Wyniki badania charakterystyk rozrusznika elektrycznego

Program badań charakterystyk rozrusznika w na stanowisku pomiarowym zakłada, iż są to badania dla celów opracowywanej metody diagnostycznej elektrycznego układu rozruchowego i silnika spalinowego w aspekcie ciśnienia sprężania ładunku, tj. do oceny szczelności jego cylindrów. Zakłada się realizację badań rozruszników różnych typów, o zróżnicowanych mocach, napięciach zasilania, zasilanych za pomocą akumulatorów o zróżnicowanej pojemności, temperaturze i stanie naładowania. Badania te mają na celu weryfikację przeprowadzonych dotychczas badań charakterystyk pracy akumulatorów, kalibrację charakterystyk rozruszników i tym samym wiarygodną ocenę momentu oporu silnika spalinowego podczas napędzania za pomocą układu rozruchowego. Z punktu widzenia metody diagnostycznej ważne jest także ustalenie wartości dopuszczalnych i granicznych diagnostycznych sygnałów rozruchu.

Obiektem badań był rozrusznik E100N o mocy znamionowej 1,5 kW, zasilany za pomocą akumulatorów o różnej pojemności, w temperaturze otoczenia 20°C. Poniżej przedstawiono zarejestrowane przebiegi wybranych prób badawczych oraz wyznaczone typowe charakterystyki rozrusznika w funkcji natężenia prądu.

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi zależności charakteryzujących parametry pracy rozrusznika na biegu jałowym. Po wyłączeniu zasilania rozrusznika widoczny jest tu okres początkowy wybiegu wałka hamulca z praktycznie liniowo malejącą wartością prędkości.

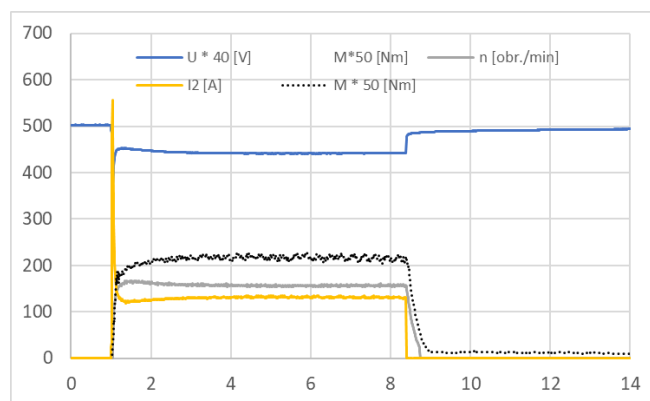


**Rys. 5.** Przebiegi sygnałów pracy rozrusznika na stanowisku do badań charakterystyk w warunkach biegu jałowego: napięcia na zaciskach akumulatora, prędkości obrotowej wałka hamulca, natężenia pobieranego prądu (odpowiednio od góry)

Mimo braku obciążenia momentem siły wytwarzanym przez hamulec, poza momentem siły wynikającym głównie z bezwładności elementów układu (i ich oporów tarcia), widoczny jest początkowy znaczny przyrost natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik i odpowiadający mu spadek napięcia na zaciskach akumulatora. Równocześnie następuje systematyczny wzrost prędkości obro-

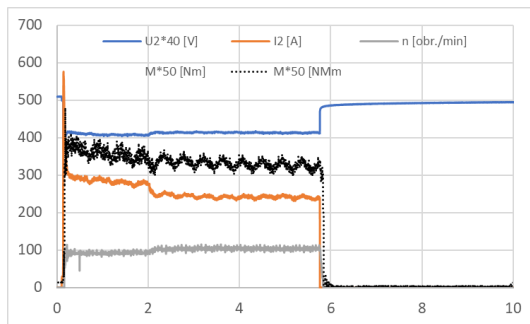
wej wałka hamulca (i odpowiednio wałka rozrusznika). Po okresie wstępnym pracy nieustalonej następuje stabilizacja parametrów pracy układu rozruchowego. Po wyłączeniu zasilania rozrusznika widoczny jest początkowy okres stopniowego, łagodnego zmniejszania się prędkości obrotowej wałka hamulca.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi sygnałów pracy rozrusznika na stanowisku w warunkach hamowania hamulcem elektrowirowym. Są to przebiegi napięcia na zaciskach akumulatora, prędkości obrotowej wałka hamulca, natężenia pobieranego prądu, momentu oporu hamulca. Charakterystyczne jest to, że przy ustalonym momencie oporu generowanym przez hamulec elektrowirowy, w okresie początkowym po włączeniu rozrusznika, podobnie jak na rysunku 5, obserwuje się tutaj początkowy intensywny, znaczny wzrost natężenia prądu i odpowiedni spadek napięcia na zaciskach akumulatora. Następnie w czasie około 0,5 s, wartość natężenia pobieranego prądu przez rozrusznik osiąga swoje minimum, zaś odpowiednio napięcie na zaciskach akumulatora oraz prędkość obrotowa wałka osiągają niewielkie lokalne maksimum. Po tym okresie następuje stabilizacja warunków i parametrów pracy układu z powodu stopniowego wzrostu momentu wytwarzanego przez hamulec elektrowirowy.



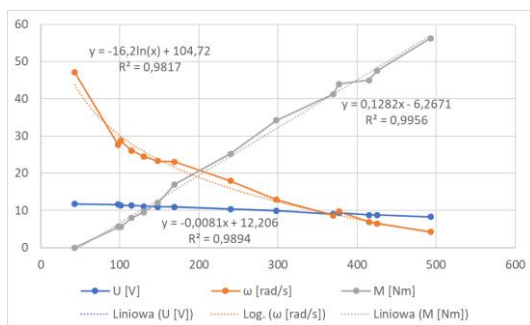
**Rys. 6.** Przebiegi sygnałów pracy rozrusznika na stanowisku w warunkach hamowania hamulcem elektrowirowym: napięcia na zaciskach akumulatora, momentu oporu hamulca, prędkości obrotowej, natężenia pobieranego prądu, (odpowiednio od góry)

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi sygnałów pracy rozrusznika na stanowisku do badań charakterystyk w warunkach hamowania hamulcem ciernym: napięcia na zaciskach akumulatora, natężenia pobieranego prądu, momentu oporu hamulca i prędkości obrotowej wałka hamulca. Na rysunku wyraźnie widoczne są dwa przedziały pracy układu: w okresie początkowym wartość wytwarzanego momentu oporu przez hamulec cierny jest większa, co skutkuje odpowiednio większym natężeniem prądu pobieranego przez rozrusznik, mniejszą wartością prędkości i mniejszą wartością napięcia na zaciskach akumulatora. Po tym wstępnym okresie pracy (ok. 2 s) następuje stabilizacja warunków pracy układu, przy czym charakterystyczne są okresowe wahania wartości momentu oporu wytwarzanego przez hamulec cierny, co wskazuje na pewną cykliczność jego pracy. Towarzyszą temu odpowiednie zmiany parametrów pracy rozrusznika i prędkości obrotowej wałka hamulca elektrowirowego. Na wytworzenie dwóch etapów, faz pracy hamulca ciernego wpływa niewątpliwie cykliczność jego pracy, nierównomierności charakterystyki tarcia i zmiany temperatury powierzchni tarcia.

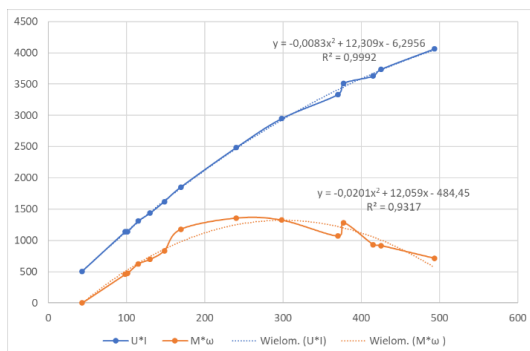


**Rys. 7.** Przebiegi sygnałów pracy rozrusznika na stanowisku do badań charakterystyk w warunkach hamowania hamulcem czarnym: napięcia na zaciskach akumulatora, momentu oporu hamulca, natężenia pobieranego prądu, prędkości obrotowej wału hamulca (odpowiednio od góry)

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono przebiegi charakterystyk pracy układu rozruchowego badanego na stanowisku. Na rysunku 8 przedstawiono uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań przebiegi charakterystyk pracy układu rozruchowego badanego na stanowisku: prędkości kątownej wału hamulca –  $\omega$ , napięcia na zaciskach akumulatora –  $U$ , momentu oporu hamulca –  $M$  w funkcji natężenia pobieranego prądu.



**Rys. 8.** Przebiegi charakterystyk pracy układu rozruchowego badanego na stanowisku: prędkości kątownej wału hamulca –  $\omega$ , napięcia na zaciskach akumulatora –  $U$ , momentu oporu hamulca –  $M$



**Rys. 9.** Przebiegi charakterystyk pracy badanego układu rozruchowego: mocy elektrycznej akumulatora –  $UI$ , mocy mechanicznej –  $M\omega$

Charakterystyczna jest tutaj bardzo duża dokładność i powtarzalność wyników badania, o czym świadczy przede wszystkim duża wartość współczynnika  $R^2$  dla funkcji regresji aproksymujących uzyskane zależności. W pełni uzasadniona jest liniowość charakterystyki napięcia w zależności od natężenia pobieranego prądu z akumulatora – liniowe zależności tego typu uzyskiwano podczas badań stanowiskowych akumulatorów. Warto natomiast zauważyć również liniowość zależności charakterystyki momentu siły wytwarzanego przez rozrusznik (wyrażaną przez moment siły

mierzony za pomocą hamulca). Podkreślić należy tu informację zawartą w pkt 1 opracowania, że „moment obrotowy jest funkcją kwadratową natężenia prądu, ..., począwszy od pewnej wartości natężenia jego przebieg ma charakter prawie liniowy”. Otrzymany wynik badania wskazuje w pełni na liniowy charakter tej zależności. Zależność prędkości obrotowej od natężenia prądu ma charakter logarytmiczny.

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi charakterystyk badanego na stanowisku pracy układu rozruchowego: mocy elektrycznej pobieranej z akumulatora, wyrażonej iloczynem napięcia na zaciskach akumulatora –  $U$  i natężenia pobieranego prądu –  $I$ , mocy mechanicznej rozrusznika, wyrażonej iloczynem momentu siły wytwarzanego przez hamulec –  $M$  i prędkości kątownej wału hamulca –  $\omega$ . Szczególnego podkreślenia wymaga tutaj fakt, że zarówno przebieg mocy elektrycznej oraz mocy mechanicznej dokładnie opisywane są za pomocą wielomianowej funkcji regresji, to jest wielomianem drugiego stopnia. W przypadku mocy elektrycznej akumulatora uzasadnieniem aproksymacji krzywą drugiego stopnia jest zależność liniowa napięcia na zaciskach akumulatora obciążonego natężeniem prądu (wyrażenie (8) dla akumulatora). Zależność mocy mechanicznej jako krzywej drugiego stopnia wynika z zależności (13) dla moc elektromagnetycznej rozrusznika pomniejszonej o wymienione wyżej straty energii. Nie wyznaczano zależności mocy elektromagnetycznej rozrusznika (jest iloczynem siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach twornika i natężenia prądu pobieranego przez silnik), ponieważ nie dokonywano pomiaru indukowanej w rozruszniku siły elektromotorycznej.

Wyznaczenie charakterystyk rozrusznika: momentu siły, prędkości obrotowej i mocy w różnych warunkach jego zasilania (napełniania wału korbowego) pozwala ocenić wpływ obciążenia, temperatury oraz stopnia naładowania akumulatora użytego jako źródło zasilania na pracę układu rozruchowego silnika.

#### 4.Badania charakterystyk napędzania wału korbowego silnika

Badania stanowiskowe silnika AD4.236 realizowano w celu wyznaczenia momentu oporów jego ruchu, a szczególnie określenia zależności oporu od ciśnienia sprężania ładunku. Miarą oporów silnika spalinowego w tym wypadku jest natężenie pobieranego prądu podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik. Do zasilania rozrusznika elektrycznego silnika podczas realizowanych badań stosowano akumulatory rozruchowe o napięciu znamionowym 12 V, o zróżnicowanej pojemności dwudziestogodzinnej i zdolności rozruchowej. W układzie rozruchowym silnika stosowano rozrusznik R11g o napięciu znamionowym 12 V i mocy 3 kW. Jest to rozrusznik szeregowo-bocznikowy wyposażony w zespół sprzęgający wysuwany po wielowypuszcie śrubowym oraz wyłącznik elektromagnetyczny.

Stanowisko do badania silnika (właściwości rozruchowych silnika) umieszczone jest w komorze chłodniczej z automatyczną regulacją zapewniającą uzyskanie temperatury w przedziale do około  $-20^{\circ}\text{C}$  i utrzymanie jej w całej objętości komory z dużą dokładnością do  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Aparatura kontrolno-pomiarowa stanowiska jest wyposażona m.in. w układy do pomiaru przebiegów:

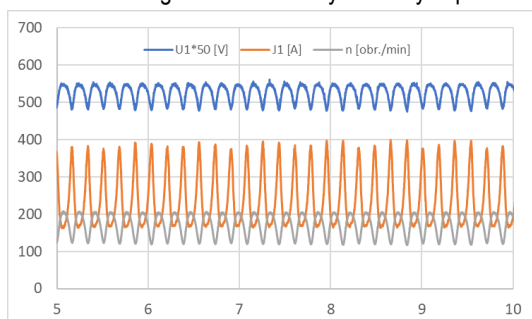
- temperatury silnika i otoczenia;
- parametrów pracy układu rozruchowego;
- prędkości obrotowej wału korbowego;
- ciśnienia indykowanego we wszystkich cylindrach silnika.

Stosowano procedury badawcze zbliżone do wymagań dotyczących badań rozruchowych silników. Bardzo istotnym aspektem procedury badań jest sposób przygotowania silnika do badań. Chłodzeniu w komorze niskich temperatur poddawano silnik wraz z akumulatorem rozruchowym. Kontrola stanu termicznego silnika



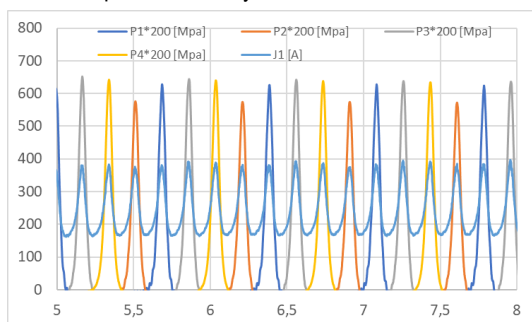
była przeprowadzana w oleju smarującym i płynie chłodzącym. Po osiągnięciu zadanej temperatury w punktach pomiarowych silnik poddawano stabilizacji. Czas stabilizacji wynosił do 12 h. Po wykonanej serii badań silnik pracował przez okres około 30 minut bez obciążenia do osiągnięcia eksploatacyjnych wartości temperatury oleju w misce olejowej i płynu chłodzącego (80°C). Po wygrzaniu silnik przygotowywano do następnej próby.

Badany silnik znajdował się zarówno w stanie równowagi termicznej z otoczeniem, jak też badania wykonywano przy braku równowagi termicznej. W celu uzyskania zróżnicowanej wartości ciśnienia w cylindrach stosowano rozszczelnienie ich przestrzeni poprzez montowanie we wtryskiwaczu, w miejscu rozpylacza elementów z kalibrowanymi otworami. W ten sposób możliwe było uzyskanie informacji o zależności momentu oporu silnika, zwłaszcza jego maksymalnej wartości, będącej miarą ciśnienia, od temperatury silnika i otoczenia, prędkości obrotowej wału korbowego, stopnia szczelności (stanu) cylindra. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań wykazujące korelację między parametrami napędzania wału korbowego przez układ rozruchowy a wartością ciśnienia w cylindrze oraz zależność tego ciśnienia od wymienionych parametrów.



**Rys. 10.** Przebiegi charakterystyk napędzania wału korbowego silnika: napięcia na zaciskach akumulatora, natężenia pobieranego prądu, prędkości obrotowej wału korbowego

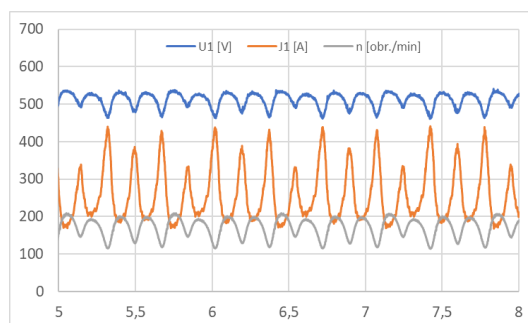
Na rys. 10. przedstawiono przebiegi zależności od czasu napięcia na zaciskach akumulatora, natężenia pobieranego prądu i prędkości obrotowej wału korbowego podczas napędzania wału korbowego za pomocą układu rozruchowego w warunkach równowagi termicznej z otoczeniem w temperaturze około 15°C. Wymienione charakterystyki napędzania wału korbowego silnika wykazują wyraźną korelację odwrotną między przebiegiem natężenia prądu a napięciem na zaciskach akumulatora i prędkością wału korbowego. Oznacza to odpowiednią zgodność ich przebiegu i zmiany w kierunku przeciwnym odpowiadające procesom sprężania i rozprężania ładunku w cylindrach silnika zgodnie z cyklem jego pracy. Łatwo jest dostrzec niewielkie zróżnicowanie wartości maksymalnej natężenia prądu i odpowiadające im zróżnicowanie minimalnych wartości napięcia i prędkości obrotowej wału korbowego, które niewątpliwie wynikają ze zróżnicowania wartości ciśnienia w kolejnych cylindrach silnika, co pokazano na rysunku 11.



**Rys. 11.** Przebiegi charakterystyk napędzania wału korbowego silnika: ciśnienia w kolejnych cylindrach silnika: P1 – P4, natężenia prądu: J1

Należy przy tym stwierdzić, że zarówno natężenie prądu, jak też napięcie czy prędkość obrotowa, mają cechy parametru diagnostycznego dla momentu oporu silnika, w szczególności maksymalnego ciśnienia sprężania ładunku i są równoważne.

Na rysunku 11 pokazano charakterystyki napędzania wału korbowego silnika z tej samej próby badawczej uwzględniające przebieg natężenia prądu pobieranego z akumulatora oraz ciśnienia sprężania w kolejnych cylindrach silnika. Łatwo jest tu zauważyć cykliczność i powtarzalność kolejnych wartości ciśnienia i odpowiadających im maksymalnych wartości natężenia prądu. Łatwo dostrzegalne są różnice wartości maksymalnej natężenia prądu, trudno jest natomiast wskazać w tym przypadku zróżnicowanie wartości minimalnych natężenia pobieranego prądu odpowiadających analogicznym fazom pracy w poszczególnych cylindrach silnika.



**Rys. 12.** Przebiegi charakterystyk napędzania wału korbowego silnika w warunkach dużego zróżnicowania ciśnienia sprężania ładunku: napięcia na zaciskach akumulatora, pobieranego natężenia prądu, prędkości obrotowej wału korbowego

Na rysunku 12 pokazano analogiczne przebiegi napędzania wału korbowego silnika, ale przy znacznym zróżnicowaniu wartości ciśnienia sprężania ładunku w poszczególnych cylindrach silnika. W tym przypadku szczególnie widoczna jest korelacja odwrotna wartości przebiegu natężenia prądu oraz napięcia i prędkości obrotowej. Odpowiednim przyrostom i spadkom wartości natężenia prądu odpowiadają spadki bądź wzrosty wartości minimalnych napięcia i prędkości obrotowej. Oczywiście istnieją tu odpowiednie związki przyczynowo-skutkowe obserwowanych zmian wartości i można je wyjaśnić przebiegiem odpowiednich zjawisk fizycznych wpływających na kształt i zależności charakterystyk rozrusznika – zmiany natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik powodują odpowiednie zmiany napięcia na zaciskach akumulatora i prędkości obrotowej napędzanego wału korbowego. Tym, co wymaga tu szczególnego podkreślenia, jest także zróżnicowanie odpowiadających procesom przemian ładunku w kolejnych cylindrach minimalnych wartości natężenia prądu, a co za tym idzie, maksymalnych wartości napięcia i prędkości obrotowej napędzania wału korbowego.

Zakres działań eksploatacyjnych dotyczących utrzymania lub przywracania stanu powinien być określony metodami diagnostycznymi. Zasadność tego typu działań jest zależna od dokładnego rozpoznania stanu urządzenia, a zwłaszcza prognozy przyszłych zmian stanu. Dlatego diagnostyka odgrywa coraz większą rolę w systemach eksploatacji urządzeń umożliwiając znaczne zwiększenie ich niezawodności. Intensywny rozwój diagnostyki technicznej związany jest z rozwojem środków pomiaru i rejestracji parametrów procesów roboczych maszyn oraz metod opracowania danych.

Istniejące związki przyczynowo-skutkowe parametrów napędzania wału korbowego przez elektryczny układ rozruchowy wskazują na możliwość wykorzystania tych sygnałów jako parametrów diagnostycznych stanu układu akumulator-rozrusznik elektryczny-silnik spalinowy. Istotę metody diagnostycznej oraz istnienie związków

ków przyczynowo-skutkowych między wielkościami pozwala wyjaśnić analiza charakterystyk rozrusznika elektrycznego, które określają także warunki współpracy rozpatrywanego układu [2].

Natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach akumulatora i prędkość obrotowa wału korbowego stanowią odpowiedź układu silnik – rozrusznik – akumulator rozruchowy na wymuszenie, jakim jest napędzanie wału korbowego silnika spalinowego. W badaniu diagnostycznym wartości cech układu powinny być określone na podstawie wartości cech sygnałów wyjściowych – odpowiedzi układu na wymuszenia zewnętrzne,

Podstawowym obiektem oceny jest silnik spalinowy w aspekcie jego oporów ruchu. Moment oporu silnika jest wielkością zależną przede wszystkim od jego cech konstrukcyjnych, lepkości oleju smarującego, oraz prędkości obrotowej napędzania wału korbowego. Stan silnika w aspekcie jego oporów rozruchu może być określony poprzez porównanie wartości momentu oporu wyznaczonego w wyniku przeprowadzonego eksperymentu (napędzania wału korbowego) oraz na podstawie formuł analitycznych. Składowa zmienna natężenia prądu rozrusznika (momentu oporu) może stanowić przesłankę do wyznaczenia wartości ciśnienia sprężania powietrza w cylindrach silnika.

Napięcie na zaciskach charakteryzuje zdolność akumulatora kwasowego do oddawania energii. Przy danym natężeniu pobieranego prądu napięcie na zaciskach akumulatora zależy od jego pojemności znamionowej  $Q$ , temperatury elektrolitu  $T$  oraz stanu naładowania  $k$ , który może być utożsamiany ze stanem technicznym źródła energii. Zależność napięcia na zaciskach akumulatora  $U$  od parametrów charakteryzujących jego stan (stopień naładowania) i obciążenie może być, w szerokim i istotnym zakresie zmienności, przyjęta jako funkcja liniowa.

## Podsumowanie

Wyniki badań realizowanych na omawianym stanowisku do badań charakterystyk układu rozruchowego zostaną wykorzystane w procesie opracowania metody diagnostycznej elektrycznego układu rozruchowego i silnika spalinowego. Dla celów diagnostyki tłokowego silnika spalinowego istnieją możliwości wykorzystania parametrów napędzania jego wału korbowego przez elektryczny układ rozruchowy [5]. Sygnałami diagnostycznymi procesu napędzania są: natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach akumulatora, prędkość obrotowa napędzania wału korbowego. Metoda diagnostyczna dotyczy elektrycznego układu rozruchowego, akumulatora i rozrusznika oraz silnika spalinowego w aspekcie jego momentu oporu, a w szczególności ciśnienia sprężania ładunku cylindrach. W stosunku do zakresu stosowanych dotychczas metod diagnostycznych, polegających na wykorzystaniu sygnałów napędzania wału korbowego, proponowana metoda ma charakter badania ilościowego, a nie tylko jakościowego – porównawczego. Uzyskanie wartości liczbowej parametrów stanu umożliwia tu zastosowanie modeli analitycznych, bądź modeli o charakterze funkcji obiektu w postaci krzywej regresji.

Zaprojektowane i wykonane stanowiska do badań charakterystyk akumulatorów oraz charakterystyk rozrusznika elektrycznego wykorzystują system pomiarowy parametrów rozruchu silnika spalinowego w komorze niskiej temperatury, kartę pomiarową nowej generacji oraz program do obsługi pomiarów i analizy ich wyników.

W wyniku przeprowadzonych badań rozwinięto zaproponowaną koncepcję metody diagnostycznej poprzez wykazanie, ocenę jakościową i ilościową zależności między parametrami elektrycznymi i mechanicznymi pracy elektrycznego układu rozruchowego a czynnikami i elementami generującymi moment oporów ruchu silnika, w szczególności ciśnieniem sprężanego ładunku powietrza. Potwierdzono także możliwości analitycznego opisu charakterystyk

pracy rozrusznika w wyniku badań na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku do badań rozruszników.

Mechaniczno-elektryczne charakterystyki pracy układu rozruchowego: natężenie prądu, napięcie na zaciskach akumulatora i prędkość obrotowa wału korbowego napędzanego przez rozrusznik są dobrymi równoważnymi sygnałami diagnostycznymi procesu napędzania wału korbowego. Moment oporów ruchu wału korbowego silnika napędzanego za pomocą elektrycznego układu rozruchowego zawiera składową stałą oraz składową zmienną, wynikającą z cykliczności pracy silnika, a w szczególności cyklicznego powtarzania procesów sprężania ładunku w cylindrach. Na podstawie modelu pracy silnika uwzględniającego moment jego oporów własnych, włączając w to moment pochodzący od sprężania oraz model procesu sprężania ładunku, możliwa jest ilościowa ocena wartości ciśnienia sprężania ładunku, czyli diagnostyczna ocena szczelności cylindra. Charakterystyki pracy akumulatora i rozrusznika umożliwiają dokonanie diagnostycznej oceny stanu elektrycznego układu rozruchowego na podstawie pomiaru parametrów napędzania wału korbowego, z zastosowaniem odpowiednich modeli tych obiektów.

## Bibliografia:

1. Ciurys M., Dudzikowski I., Gierak D., Modelling of a car starter with permanent magnet commutator motor, COMPEL, Vol. 28.
2. Constantinescu L., Enache B., Lefter E., Modeling aspects of an electric starter system for an internal combustion engine, ECAI – International Conference, Bucharest, ROMANIA, 2014.
3. Jackey R., A., A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection. The MathWorks, Inc. 2007-01-0778.
4. Pijanowski B., Rozrusznik. WKŁ, Warszawa, 1993.
5. Pszczółkowski J., Rozruch silnika spalinowego jako proces diagnostyczny, Diagnostyka vol. 27, 2002.

## Study of the electric starter characteristics

The article describes the principle of operation of the electric starter of the starting system of the internal combustion engine. Basic processes and dependencies were described, and the characteristics of the starter's work were discussed. The station for the starter testing, allowing the examination of its characteristics and technical condition when powered by a battery and braking by means of an electro-spin and friction brake, was characterized. The station also allows testing the battery operation characteristics in the conditions of the starter power supply at its constant load. The results of tests of the functioning of the starting system and its components, the battery and the starter in the stationary conditions and while driving the engine crankshaft are presented. The possibilities of using the crankshaft driving signals as diagnostic signals of the state of the battery, starter and combustion engine are indicated. The signals recorded while driving the engine crankshaft by the starter were discussed.

**Keywords:** starter, engine electric starting system, starter operating characteristics.

## Autorzy:

dr hab. inż. **Józef Pszczółkowski**, prof. WAT – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. gen. Witolda Urbanowicza 2. tel. 261 837 206, email: jozef.pszczolkowski@wat.edu.pl