

THE CHANGES OF ELECTRICAL STARTER POWER CHARACTERISTIC DURING CRANKSHAFT DRIVING

Józef Pszczółkowski

Military Academy of Technology
Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6837146, fax: +48 22 6839765
e-mail: j.pszczolkowski@wme.wat.edu.pl

Abstract

The course of vehicle electrical starter power characteristic as a current function depends on battery properties, its useful capacity, and directly on voltage on its ends. This characteristic can be circumscribed using second stage polynomial as a function of current. The dependence of power characteristic on voltage resource causes that at given engine starting conditions starter operates on a different real power characteristic.

In engine starting conditions its resistance torque is a changeable quantity. Thus starter takes from battery a current with variable value. Acid battery has significant dynamic properties connected with existing the polarisation voltage at unsteady current loading. Polarisation voltage existing causes the changes on the ends of battery and starter. So it can be said, that at given engine starting conditions periodical change of battery electrical properties takes place. It causes as a result the changes of electrical starter power characteristic during engine crankshaft driving. There are presented starter power characteristics at its characteristic operating points according to current course.

Keywords: combustion engines, start-up at low temperature, electrical starting system

ZMIANY CHARAKTERYSTYKI MOCY ROZRUSZNIKA ELEKTRYCZNEGO PODCZAS NAPĘDZANIA WAŁU KORBOWEGO

Streszczenie

Przebieg charakterystyki mocy samochodowego rozrusznika elektrycznego jako funkcji natężenia prądu jest zależny od właściwości akumulatora zasilającego, jego pojemności użytecznej, a bezpośrednio od napięcia na jego zaciskach. Charakterystyka ta może być z dużą dokładnością opisana wielomianem drugiego stopnia w funkcji natężenia prądu. Zależność charakterystyki mocy od źródła napięcia powoduje, że w określonych warunkach rozruchu silnika rozrusznik pracuje na różnej rzeczywistej charakterystyce mocy.

W warunkach rozruchu silnika jego moment oporu jest wielkością zmienną. Stąd również rozrusznik pobiera z akumulatora prąd o zmiennym natężeniu. Akumulator kwasowy wykazuje istotne właściwości dynamiczne związane z występowaniem siły elektromotorycznej polaryzacji uwidaczniającej się w warunkach niestabilnego obciążenia prądowego. Istnienie siły elektromotorycznej polaryzacji powoduje określone zmiany napięcia na zaciskach akumulatora i rozrusznika. Dlatego można stwierdzić, że w danych warunkach rozruchu następuje okresowa zmiana właściwości elektrycznych akumulatora. Powoduje to w efekcie zmiany charakterystyki mocy rozrusznika podczas napędzania wału korbowego silnika. Przedstawiono charakterystyki mocy rozrusznika w charakterystycznych punktach jego pracy określonych według przebiegu natężenia prądu.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, rozruch w niskiej temperaturze, elektryczny układ rozruchowy

1. Wstęp

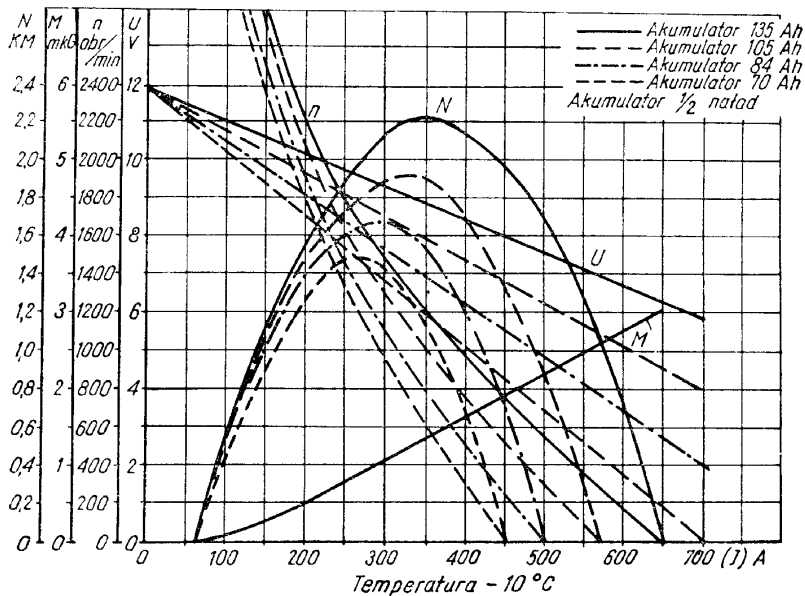
Rozruch silnika spalinowego jest procesem przejścia od stanu spoczynku do samodzielnej pracy jego wszystkich układów. Aby zrealizować ten proces należy dostarczyć energię z zewnątrz w celu zrównoważenia momentu oporu silnika i nadania jego wałowi korbowemu odpowiedniej

prędkości obrotowej. Najczęstszym sposobem realizacji rozruchu jest napędzanie wału korbowego za pomocą rozrusznika elektrycznego. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi dobrany do silnika spalinowego układ rozruchowy są: moc znamionowa rozrusznika, pojemność akumulatora i przełożenie między wieńcem koła zamachowego i zębniakiem rozrusznika. Właściwości użytkowe układu przedstawia się za pomocą zbioru charakterystyk rozrusznika, obejmujących zależność momentu siły, prędkości obrotowej, mocy i napięcia na zaciskach od natężenia pobieranego prądu. Przykładowy zbiór charakterystyk rozrusznika, charakteryzujących jego cechy mechaniczno-energetyczne, przedstawiono na rys. 1 [1]. Z punktu widzenia spełnianych przez rozrusznik zadań najważniejszą jego charakterystyką jest zależność momentu od natężenia prądu. Moment obrotowy rozrusznika (moment elektromagnetyczny) powstaje jako wynik oddziaływania pola magnetycznego na przewodnik z prądem i jest równy [1]:

$$M_{em} = c_1 \Phi_{wz} I = c_1 c_2 I^2 = c I^2, \quad (1)$$

gdzie:

- Φ_{wz} – strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie wzbudzenia,
- I – natężenie płynącego prądu,
- c_1, c_2, c – stałe konstrukcyjne silnika.



Rys. 1. Zbiór charakterystyki rozrusznika 1,3 kW 12 V w temperaturze -10°C
 Fig. 1. The set of starter 1,3 kW 12 V at temperature of -10°C

Moment obrotowy na wale rozrusznika osiąga wartości mniejsze i ze względu na nasycenie obwodu magnetycznego rozrusznika, począwszy od pewnej wartości natężenia prądu, ma przebieg prawie liniowy zależny tylko od natężenia płynącego przez rozrusznik prądu. Maksimum wartości momentu sił wytworzonego przez rozrusznik zależy od jego cech konstrukcyjnych oraz zdolności akumulatora do oddawania prądu i zachowania odpowiednio wysokiej wartości napięcia na zaciskach. Natomiast charakterystyka mocy rozrusznika elektrycznego (i jego prędkości obrotowej) jako funkcji natężenia prądu ma przebieg zależny od właściwości akumulatora zasilającego, jego pojemności użytecznej, a bezpośrednio od napięcia na jego zaciskach.

Zależność charakterystyki mocy od źródła napięcia powoduje, że w określonych warunkach rozruchu silnika rozrusznik pracuje na różnej rzeczywistej charakterystyce mocy.

2. Rzeczywiste charakterystyki mocy rozrusznika w warunkach rozruchu silnika

Charakterystyka mocy rozrusznika podawana przez producenta nie jest bezpośrednio przydatna do analizy parametrów jego pracy w warunkach rozruchu silnika, głównie ze względu na zmiany rezystancji wewnętrznej akumulatora wraz ze zmianą temperatury. Dane charakterystyczne i charakterystyki rozruszników podawane przez producentów są sporządzane dla danej pojemności, temperatury i stopnia naładowania akumulatora. Wartości nominalnych parametrów pracy, dotyczą więc tylko warunków, w których zostały wyznaczone. Zmieniając napięcie na zaciskach akumulatora można zmieniać możliwą do uzyskania wartość maksymalną momentu, prędkości i mocy rozrusznika. Właściwości pracy rozrusznika w danej konkretnej próbie uruchamiania silnika można określać za pomocą rzeczywistej charakterystyki jego mocy. Metodę wyznaczania rzeczywistej charakterystyki mocy rozrusznika podano w [2]. Charakterystyka może być z dużą dokładnością opisana wielomianem drugiego stopnia w funkcji natężenia prądu.

$$P = aI^2 + bI + c, \quad (2)$$

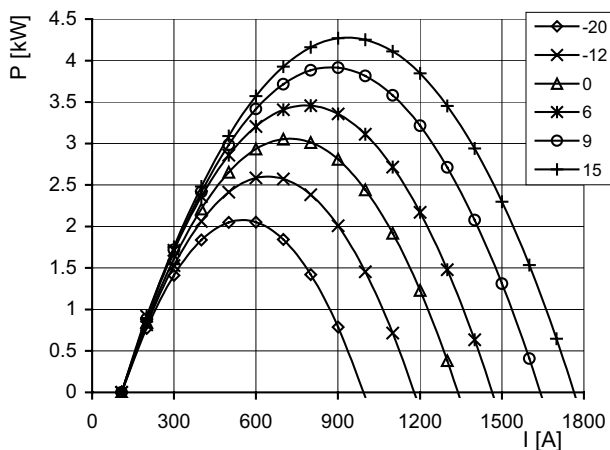
gdzie:

P - moc rozrusznika, [kW] lub [KM],

a, b, c - współczynniki funkcji regresji,

I - natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik [A].

Na rys. 2. przedstawiono wyznaczone na podstawie opracowanej metodyki rzeczywiste charakterystyki mocy rozrusznika R11g podczas rozruchu silnika AD4.236 w różnych temperaturach otoczenia.



Rys. 2. Przebieg charakterystyk mocy rozrusznika R11g w różnych temperaturach rozruchu silnika

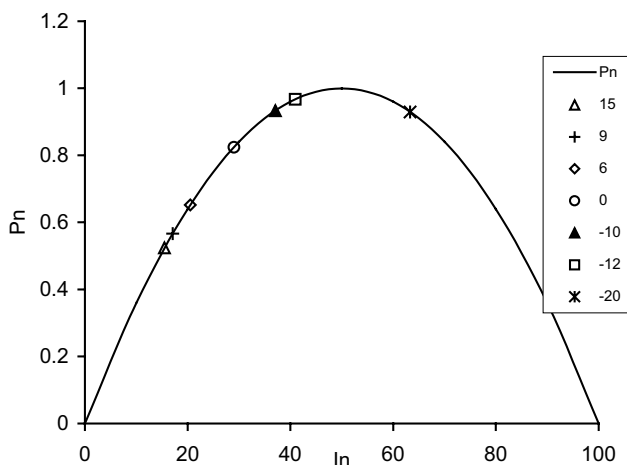
Fig. 2. The R11g starter power characteristics at different temperatures

Na rysunku widoczna jest zmiana przebiegu rzeczywistej charakterystyki mocy rozrusznika wraz z obniżaniem wartości temperatury w kierunku malejących mocy maksymalnych oraz zmniejszania wartości prądu zwarcia. Wynika to ze zmiany cech akumulatora kwasowego zasilającego rozrusznik, tj. wzrostu jego rezystancji wewnętrznej, co przy poborze prądu o określonym natężeniu powoduje zwiększony spadek napięcia na rezystancji, a w efekcie obniżenie napięcia na zaciskach akumulatora i rozrusznika.

Opracowano również metodę odwzorowania charakterystyk rzeczywistych rozrusznika na jedną normowaną charakterystykę mocy [2] w celu umożliwiania porównywania cech pracy rozrusznika w zróżnicowanych warunkach uruchamiania silników. Ocena warunków pracy rozrusznika wymaga określenia położenia jego punktu pracy względem określonych punktów odniesienia na rzeczywistej charakterystyce mocy, którymi są:

- wartość prądu biegu jałowego;
- punkt mocy maksymalnej rozrusznika;
- wartość prądu zwarcia.

Założono, że charakterystyka normowana ma również postać krzywej drugiego stopnia. Przyjęto dla niej stałe bezwymiarowe wartości współrzędnych normowanych natężenia prądu i mocy. Położenie punktów pracy rozrusznika R11g podczas rozruchu silnika AD4.236 w różnych temperaturach zaznaczono na normowanej charakterystyce mocy przedstawionej na rys. 3.



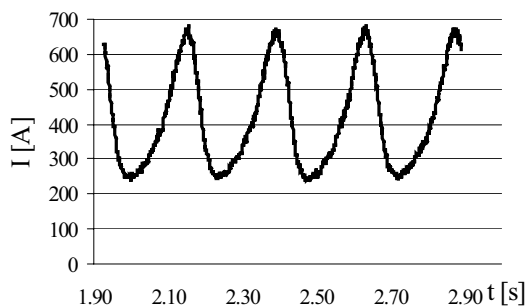
Rys. 3. Położenie punktów pracy rozrusznika R11g na charakterystyce normowanej
Fig. 3. The operating points of R11g starter on its normalized power characteristic

Na charakterystyce normowanej widoczne jest przemieszczanie punktu pracy w kierunku wzrastających wartości natężenia prądu wraz z obniżaniem wartości temperatury. W zakresie temperatur do $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ punkt pracy rozrusznika zbliża się do położenia mocy maksymalnej. Obserwowano tu nieznaczne obniżenie prędkości wału korbowego silnika przy spadku temperatury rozruchu, oraz możliwość napędzania wału korbowego silnika z ustaloną prędkością obrotową w dostatecznie długim przedziale czasu. Po przekroczeniu punktu mocy maksymalnej na charakterystyce rozrusznika (w temperaturze $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik maleje bardzo szybko.

3. Zmiany charakterystyki mocy rozrusznika w cyklu rozruchowym silnika

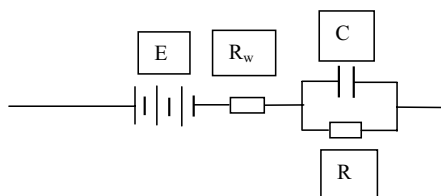
Na rys. 4. przedstawiono przykład przebiegu natężenia prądu w cyklu rozruchowym silnika AD.4236 w temperaturze $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Wiadomo jest i wynika to także z rys. 4, że podczas rozruchu silnika tłokowego występuje duża nierównomierność natężenia pobieranego przez rozrusznik prądu wynikająca ze zmian chwilowej wartości momentu oporu silnika – stąd wynika także nierównomierność prędkości obrotowej. Przedstawione powyżej charakterystyki rzeczywistej mocy rozrusznika pokazują jej zmiany w różnych warunkach rozruchu silnika (rys. 2). Parametry tych charakterystyk są wyznaczane dla wartości średnich natężenia prądu i prędkości w cyklu pracy (rozruchu) silnika.



Rys. 4. Przebieg natężenia prądu rozrusznika R11g w cyklu rozruchu silnika AD4.236
 Fig. 3. The course of R11g starter current during AD4.236 engine starting

W pracy [3] wykazano, że podczas rozruchu silnika, akumulator wykazuje istotne właściwości dynamiczne, które związane są z występowaniem siły elektromotorycznej polaryzacji elektrod uwidaczniającej się w warunkach nieustalonego obciążenia prądowego. Istnienie siły elektromotorycznej polaryzacji powoduje określone dodatkowe zmiany napięcia na zaciskach akumulatora i rozrusznika wynikające nie tylko z wartości natężenia pobieranego prądu, a związane z szybkością jego zmian. Przyczyną istnienia siły elektromotorycznej polaryzacji jest zarówno gradient stężenia elektrolitu bezpośrednio w pobliżu elektrod, jak też tworzenie się tzw. podwójnej warstwy przyściennej silnie zjonizowanej na elektrodach akumulatora. Wskutek istnienia siły elektromotorycznej polaryzacji schemat zastępczy akumulatora kwasowego może być przedstawiony jak na rys. 5. Na schemacie E reprezentuje siłę elektromotoryczną akumulatora, R_w – opór wewnętrzny, C , R – parametry elektryczne (pojemność i rezystancja) związane z istnieniem siły elektromotorycznej polaryzacji.

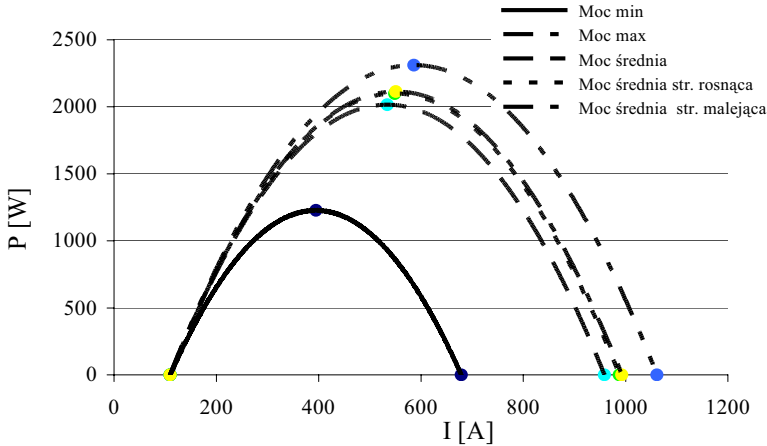


Rys. 5. Elektryczny schemat zastępczy akumulatora kwasowego
 Fig. 5. The electrical scheme of acid battery

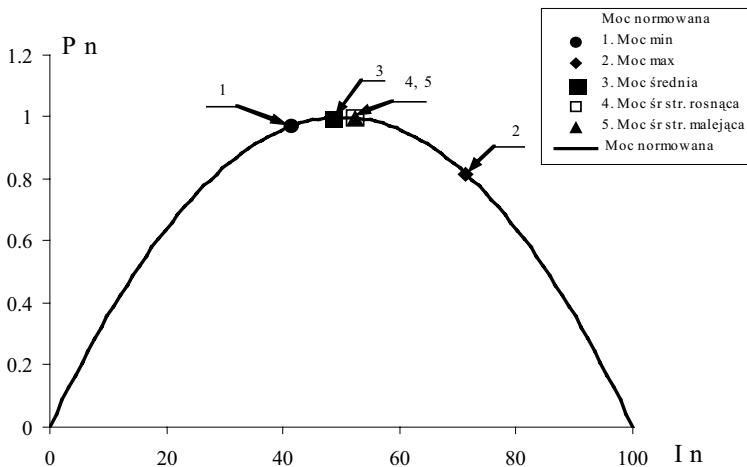
Dlatego można stwierdzić, że w danych warunkach rozruchu następuje okresowa zmiana właściwości elektrycznych akumulatora w kolejnych chwilach napędzania wału korbowego. Powinno to w efekcie powodować zmiany charakterystyki mocy rozrusznika podczas napędzania wału korbowego silnika w podstawowym okresie rozruchu, którym jest najmniejszy przedział zmienności natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. W związku z tym wyznaczono przebiegi rzeczywistej charakterystyki mocy rozrusznika w wybranych chwilach cyklu napędzania wału korbowego silnika AD4.236. Dla zilustrowania zmian chwilowej charakterystyki mocy rozrusznika R11g zasilanego za pomocą akumulatora o pojemności 120 Ah wybrano punkty:

1. maksymalnej wartości natężenia prądu;
2. minimalnej wartości natężenia prądu;
3. wartości średniej natężenia prądu (w pełnym cyklu rozruchowym);
4. wartości średniej natężenia prądu ($0,5(I_{\min} + I_{\max})$) po stronie wartości malejących;
5. wartości średniej natężenia prądu po stronie wartości wzrastających.

Rzeczywiste chwilowe charakterystyki mocy rozrusznika i charakterystykę normowaną w tych punktach pracy wyznaczano według wymienionej wyżej metodyki. Przykładowe wyniki obliczeń dla fazy wstępnej rozruchu silnika w temperaturze -12°C przedstawiono na rys. 6 i 7. Widoczne są duże zmiany przebiegu rzeczywistej chwilowej charakterystyki mocy w różnych punktach pracy rozrusznika, a wzajemne położenie poszczególnych krzywych można uzasadnić istnieniem siły elektromotorycznej polaryzacji i jej wpływem na napięcie na zaciskach. W szczególności położenie krzywej mocy przy poborze maksymalnej wartości natężenia prądu (*Moc max*) osiągającej najwyższe wartości wynika z faktu, że siła elektromotoryczna polaryzacji dąży w tym okresie do utrzymania stanu pracy akumulatora (napięcia), jaki występował przy poborze prądu o mniejszym natężeniu, a więc do podwyższenia napięcia na jego zaciskach. Stąd rozrusznik pracuje w tym momencie na korzystniejszej dla przebiegu rozruchu silnika krzywej mocy i prędkość obrotowa wału korbowego jest nieco wyższa niż byłaby w warunkach ustalonych.



Rys. 6. Zbiór charakterystyk mocy rozrusznika R11g podczas rozruchu silnika AD4.236 w temperaturze -12°C
 Fig. 6. The set of R11g starter power characteristics during AD4.236 engine starting at temperature of -12°C



Rys. 7. Położenie punktów pracy rozrusznika R11g na charakterystyce normowanej podczas rozruchu silnika AD4.236 w temperaturze -12°C
 Fig. 7. The operating points of R11g starter on its normalized power characteristic during AD4.236 engine starting at temperature of -12°C

Wyraźnie widoczna jest także istotna zmiana położenia punktów pracy rozrusznika na jego charakterystyce normowanej. Przy tym położenie punktu pracy (*Moc max*) poza wartością mocy maksymalnej świadczy o niekorzystnych warunkach napędzania wału korbowego silnika przy poborze maksymalnej wartości natężenia prądu, czego nie jest w stanie w pełni skompensować istnienie siły elektromotorycznej polaryzacji akumulatora.

Literatura

- [1] Pomykański, Z., *Elektrotechnika samochodów*, WKŁ, Warszawa, 1978.
- [2] Pszczołkowski, J., *Metoda wyznaczania charakterystyki mocy rozrusznika*, Biuletyn WAT, nr 9, str. 143 – 157, 2001.
- [3] Pszczołkowski, J., Koliński, K., *Napędzanie wału korbowego silnika przez elektryczny układ rozruchowy*, 28th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2002, Jurata, str. 208 - 215, 2002.

