

*maszyny elektryczne, zasilanie akumulatorowe  
silniki bezszczotkowe, rozruszniki samochodowe,  
magnesy trwałe, obliczenia*

Marek CIURYS\*  
Ignacy DUDZIKOWSKI\*

## **ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW AKUMULATORA NA PRACĘ ROZRUSZNIKA SAMOCHODOWEGO Z SILNIKIEM BLDC**

Przedstawiono model matematyczny akumulatora uwzględniający wpływ temperatury otoczenia, pojemności znamionowej, wartości prądu obciążenia oraz stopnia naładowania akumulatora na jego parametry (siłę elektromotoryczną, rezystancję wewnętrzną oraz pojemność chwilową). Korzystając z opracowanego modelu matematycznego, obliczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator-rozrusznik samochodowy z silnikiem BLDC-silnik spalinowy. Wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika. Obliczenia wykonano w różnej temperaturze otoczenia, przy zasilaniu rozrusznika akumulatorami o różnej pojemności znamionowej.

### **1. WPROWADZENIE**

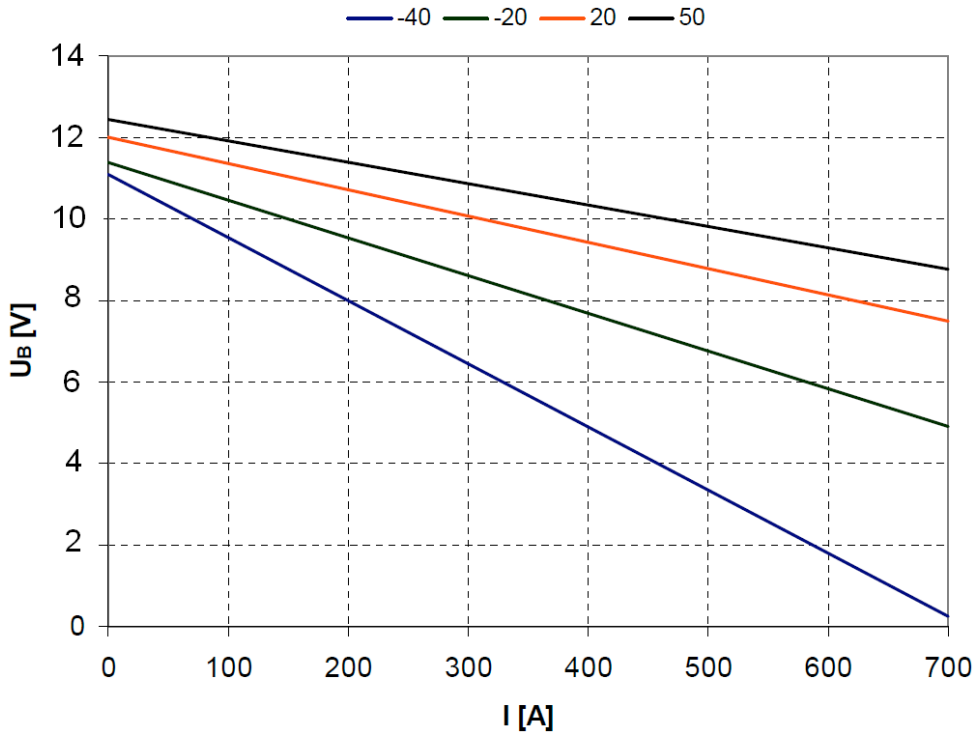
Rozruszniki samochodowe są specyficznymi maszynami elektrycznymi. Pracują w szerokim zakresie temperatury (od  $-40$  do  $150$  °C) [5, 6]. Przy pierwszym rozruchu silnika spalinowego ze stanu zimnego temperatura akumulatora  $\mathcal{G}_B$ , silnika rozrusznika  $\mathcal{G}$  oraz silnika spalinowego  $\mathcal{S}$  są takie same jak temperatura otoczenia  $\mathcal{G}_o$ . W przypadku kolejnych rozruchów temperatury te są różne.

Szczególnie niekorzystna jest praca w ujemnych temperaturach, ponieważ wartość momentu obciążenia rozrusznika wzrasta utrudniając rozruch silnika spalinowego. Główną przyczyną jest wzrost momentu tarcia silnika spalinowego wynikający ze wzrostu lepkości oleju. Dodatkowym utrudnieniem (w stosunku do temperatur

---

\* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-372 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19, e-mail: marek.ciurys@pwr.wroc.pl, ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl

dotatnich) jest zmiana parametrów akumulatora. Zmniejszeniu ulega wartość siły elektromotorycznej akumulatora (rys. 1, 2), zwiększa się natomiast jego rezystancja wewnętrzna. Wolniej zachodzące w niskich temperaturach reakcje chemiczne w elektrolicie powodują zmniejszenie pojemności akumulatora. W zależności od stopnia naładowania, może nastąpić nawet zamarznięcie elektrolitu, co uniemożliwia pracę akumulatora i może doprowadzić do jego zniszczenia [9].



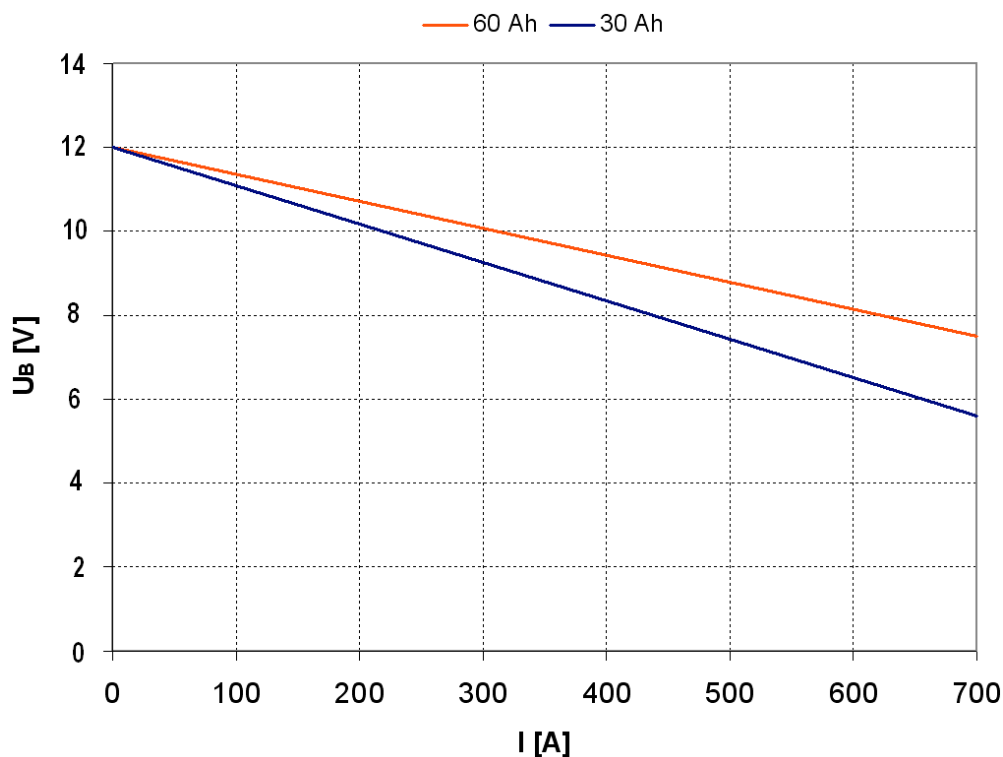
Rys. 1. Charakterystyki zewnętrzne akumulatora kwasowo-olowiowego o pojemności znamionowej 60 Ah w różnej temperaturze

Fig. 1. Lead-acid battery voltage versus current for different temperature; battery nominal capacity 60 Ah

Napięcie na silniku rozrusznika zmienia się w trakcie pracy, co wynika ze zmian prądu obciążenia oraz zmian parametrów akumulatora [1–4, 8, 12, 13]. Napięcie  $u_B$  na zaciskach akumulatora (rys. 1, 2) zależy od jego pojemności znamionowej, stopnia naładowania, temperatury oraz od wartości pobieranego prądu.

Moment obciążenia rozrusznika generowany przez silnik spalinowy zmienia się w szerokim zakresie. Przyczyną tego są zmiany momentu tarcia w silniku spalinowym zależne od temperatury i wartości chwilowej prędkości obrotowej oraz zmiany momentu kompresji i dekompresji gazów w cylindrach zależne od kąta obrotu wału kor-

bowego. Zmienny jest również moment bezwładności układu. Przyczyną jego zmian jest ruch posuwisto-zwrotny tłoków i korbowodów silnika spalinowego (rys. 3).



Rys. 2. Charakterystyki zewnętrzne akumulatorów o pojemności znamionowej 30 Ah i 60 Ah;  $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 Fig. 2. Battery voltage versus current for battery nominal capacity 30 Ah and 60 Ah;  $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pulsacje momentu obciążenia przenoszą się na przebiegi czasowe pozostałych wielkości mechanicznych i elektrycznych w układzie: akumulator–rozrusznik samochodowy–silnik spalinowy.

W rozrusznikach pojazdów samochodowych stosowane były silniki wzbudzone elektromagnetycznie: szeregowo lub szeregowo-bocznikowe [8]. Postęp w technologii wytwarzania magnesów trwałych doprowadził do rozwoju rozruszników z silnikami komutatorowymi o magnesach trwałych [3, 5, 6, 11]. Są one zwykle wyposażone w przekładnię planetarną zwiększającą moment i zmniejszającą prędkość obrotową wirnika, co powoduje zmniejszenie objętości rozrusznika. Zastosowanie magnesów trwałych spowodowało zmniejszenie wymiarów i masy oraz zwiększenie sprawności rozruszników. Aktualnie są one powszechnie stosowane w samochodach osobowych.

Od kilku lat trwają prace nad wprowadzeniem nowego systemu elektrycznej instalacji samochodowej składającej się z klasycznej instalacji o napięciu 14V oraz instalacji o napięciu 42 V [7, 10]. Instalacja o napięciu 42 V, przeznaczona jest do zasilania odbiorników pobierających dużą moc, w tym rozrusznika. Wprowadzenie instalacji samochodowej o napięciu 42 V spowoduje zmniejszenie wartości prądów pobieranych przez odbiorniki dużej mocy, w tym przez rozruszniki, co umożliwi zmniejszenie przekrojów i masy przewodów zasilających. Wprowadzenie instalacji o napięciu 42 V umożliwi również zastąpienie alternatora oraz rozrusznika samochodowego jedną maszyną spełniającą obydwie funkcje [7, 10].

Celem pracy jest wyznaczenie wpływu zmian parametrów akumulatora na przebiegi czasowe i charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika samochodowego z silnikiem BLDC.

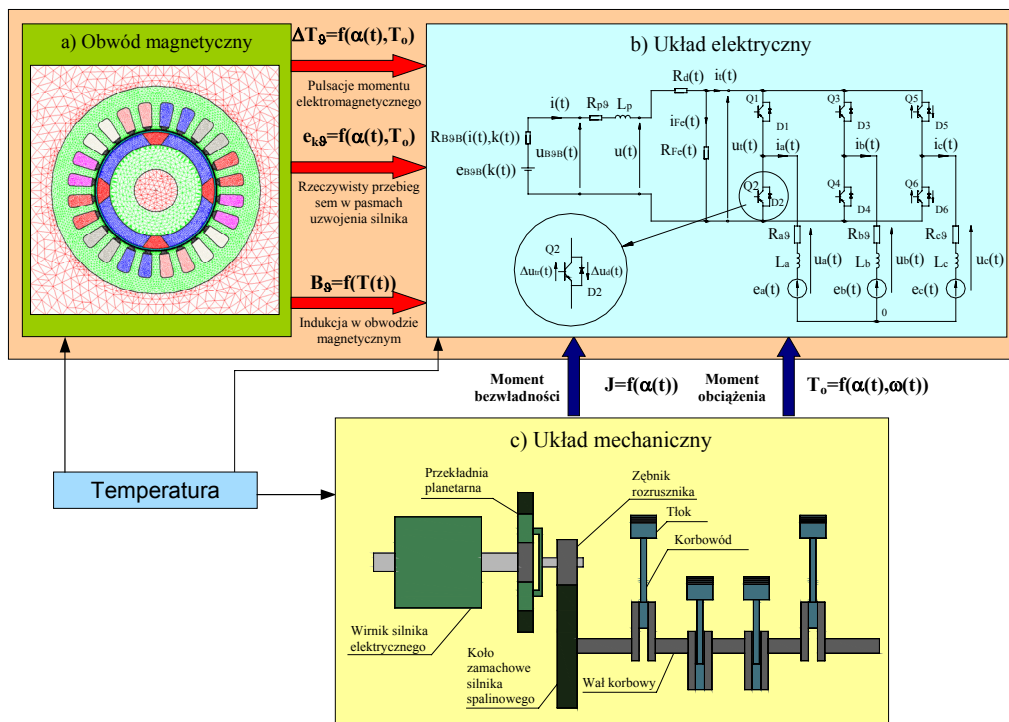
## 2. ANALIZOWANY UKŁAD ELEKTROMECHANICZNY; MODEL MATEMATYCZNY AKUMULATORA

Rozruch silników spalinowych jest złożonym procesem elektromechanicznym, podczas którego zmieniają się wielkości elektryczne, magnetyczne i mechaniczne w układzie: akumulator–silnik elektryczny rozrusznika–silnik spalinowy. Dlatego przy analizie obliczeniowej procesu rozruchu konieczne jest uwzględnienie całego układu elektromechanicznego (rys. 3) czyli: obwodu elektrycznego (rys. 3.1a), obwodu magnetycznego silnika (rys. 3.1b) i układu mechanicznego (elementów poruszających się ruchem obrotowym oraz elementów w ruchu posuwisto-zwrotnym: rysunki 3.1c). Obwód elektryczny (rys. 3.1a) zawiera akumulator i przekształtnik zasilający trójfazowe uzwojenie silnika. Obwód magnetyczny silnika BLDC (rys. 3.1b) składa się z wirnika na którym umieszczone są magnesy trwałe oraz stojana wykonanego z pakietu blach, w którym umieszczone jest uzwojenie trójfazowe. W skład układu mechanicznego (rys. 3.1c) wchodzi: wirnik silnika elektrycznego, przekładnia planetarna rozrusznika, zębnik rozrusznika, koło zamachowe, wał korbowy oraz korbowody i tłoki silnika spalinowego. Moment bezwładności elementów w ruchu posuwisto-zwrotnym, czyli tłoków i korbowodów silnika spalinowego (rys. 3.1c), jest funkcją kąta położenia wału korbowego.

Analizując pracę takiego układu (rys. 3) należy uwzględnić parametry akumulatora, czyli jego siłę elektromotoryczną oraz rezystancję wewnętrzną. Do wykonania poprawnych obliczeń całego układu elektromechanicznego (rys. 3) niezbędne jest uwzględnienie ich zależności od pojemności, wartości chwilowej prądu, temperatury oraz stopnia naładowania akumulatora [2].

Rezystancja wewnętrzna akumulatora zależy od rezystancji elektrolitu, prądu obciążenia oraz rezystancji elektrod. Rezystancja elektrolitu [12]  $R_{el,9B}$  jest odwrotnie proporcjonalna do jego temperatury  $\mathcal{G}_B$ . Zmniejsza się również ze wzrostem stopnia

naładowania akumulatora [12]. Rezystancja elektrod  $R_e$  jest odwrotnie proporcjonalna do chwilowej pojemności elektrycznej  $Q_{gB}(t)$  akumulatora [12].



Rys. 3. Analizowany układ elektromechaniczny  
Fig. 3. Analysed electromechanical system

Chwilowa rezystancja wewnętrzna akumulatora [12] w temperaturze  $\mathcal{G}_B$

$$R_{B,gB}(i(t), k(t)) = R_{el,gB}(Q_{gB}(t)) + R_e(Q_{gB}(t)) + \frac{n_o \cdot b_{gB}(k(t)) \cdot e_{gB}(k(t))}{i(t)}, \quad (1)$$

przy czym:

- $i(t)$  – wartość chwilowa prądu,
- $\frac{n_o \cdot b_{gB}(k(t)) \cdot e_{gB}(k(t))}{i(t)}$  – rezystancja polaryzacji,
- $n_o$  – liczba szeregowo połączonych ogniw akumulatora,
- $e_{gB}(k(t))$  – siła elektromotoryczna jednego ogniwa w temperaturze  $\mathcal{G}_B$  przy stopniu naładowania akumulatora  $k(t)$ ,
- $\mathcal{G}_B$  – temperatura akumulatora,

$b_{gB}(k(t))$  – współczynnik określający względną zmianę siły elektromotorycznej ogniwa w temperaturze  $g_B$ , przy przepływie prądu  $i(t)$ , stopniu naładowania akumulatora  $k(t)$ , odniesioną do sem ogniwa przy pojemności znamionowej,

Chwilowa pojemność elektryczna akumulatora w temperaturze  $g_B$

$$Q_{gB}(t) = k_p \cdot Q_{p,gB} - Q_w(t) = k_p \cdot Q_{gB} - \int_0^t (i(t))^{n_p} dt. \quad (2)$$

przy czym:

$k_p$  – początkowy stopień naładowania akumulatora,

$Q_{p,gB}$  – pojemność początkowa akumulatora w temperaturze  $g_B$  przy pełnym naładowaniu

$$Q_{p,gB} = Q_{gBn} \cdot [1 + \alpha_Q \cdot (g_B - g_{Bn})], \quad (3)$$

$g_{Bn}$  – temperatura znamionowa akumulatora ( $g_{Bn} = 20$  °C),

$Q_{gBn}$  – pojemność znamionowa akumulatora (w temperaturze  $g_{Bn}$ ),

$\alpha_Q$  – temperaturowy współczynnik zmiany pojemności,

$Q_w(t)$  – pojemność wyładowania akumulatora czyli funkcja określająca ładunek elektryczny, o który zmniejszyła się pojemność akumulatora podczas jego wyładowania [12],

$t$  – czas obciążenia akumulatora prądem  $i(t)$ ,

$n_p$  – stała Peukerta zależna od rodzaju akumulatora.

Stopień naładowania akumulatora

$$k(t) = \frac{Q_{gB}(t)}{Q_{gBn}} = k_p \cdot \frac{Q_{p,gB}}{Q_{gBn}} - \frac{1}{Q_{gBn}} \int_0^t (i(t))^{n_p} dt. \quad (4)$$

Przekształcając równanie (1) i wykorzystując (4), otrzymuje się [12]

$$R_{B,gB}(i(t), k(t)) = \frac{l}{k(t)} + \frac{n_o \cdot b_{gB}(k(t)) \cdot e_{gB}(k(t))}{i(t)}, \quad (5)$$

przy czym:

$e_{gB}(k(t))$  – wartość chwilowa sem jednego ogniwa w temperaturze  $g_B$ , zależna od stopnia naładowania akumulatora

$$e_{gB}(k(t)) = E_{\min} + \Delta U \cdot k(t) + \alpha_e \cdot (g_B - g_{Bn}), \quad (6)$$

$$\Delta U = E_{\max} - E_{\min}, \quad (7)$$

- $E_{\max}$  – siła elektromotoryczna jednego ogniwa przy pełnym naładowaniu ( $k = 1$ ), w temperaturze znamionowej ( $\mathcal{G}_B = \mathcal{G}_{Bn}$ ),
- $E_{\min}$  – siła elektromotoryczna ogniwa przy całkowitym rozładowaniu ( $k = 0$ ), w temperaturze znamionowej ( $\mathcal{G}_B = \mathcal{G}_{Bn}$ ),
- $b_{\mathcal{G}B}(k(t))$  – współczynnik określający względną zmianę siły elektromotorycznej ogniwa w temperaturze  $\mathcal{G}_B$ , przy przepływie prądu  $i(t)$ , stopniu naładowania akumulatora  $k(t)$ , odniesiony do sem ogniwa przy pojemności znamionowej. Określa go wyprowadzona na podstawie [12] zależność

$$b_{\mathcal{G}B}(k(t)) = \frac{e_{\mathcal{G}B}(k(t)) - (E_{\min} + \alpha_e \cdot (\mathcal{G}_B - \mathcal{G}_{Bn}))}{(E_{\max} + \alpha_e \cdot (\mathcal{G}_B - \mathcal{G}_{Bn}))}, \quad (8)$$

- $\alpha_e$  – temperaturowy współczynnik zmian siły elektromotorycznej ogniwa

$$\alpha_e = \frac{U_{B\mathcal{G}n}(0) - U_{B\mathcal{G}B}(0)}{n_o \cdot (\mathcal{G}_{Bn} - \mathcal{G}_B)}, \quad (9)$$

wartość  $\alpha_e$  wyznacza się na podstawie danych producenta,

$U_{B\mathcal{G}n}(0)$  – napięcie akumulatora w stanie bezprądowym, w temperaturze znamionowej  $\mathcal{G}_{Bn}$  (wartość wyznaczona z charakterystyki napięciowo-prądowej akumulatora, rysunek 1),

$U_{B\mathcal{G}B}(0)$  – napięcie akumulatora w stanie bezprądowym, w temperaturze  $\mathcal{G}_B$  (rys. 1).

Do wyznaczenia rezystancji wewnętrznej akumulatora z zależności (5) potrzebny jest współczynnik  $l$ . Określa go wyprowadzona zależność

$$l = \frac{n_o \cdot e_{\mathcal{G}B}(k(I)) \cdot |\delta U_{B\mathcal{G}B}(I) - b_{\mathcal{G}B}(k(I))| \cdot k(I)}{I}, \quad (10)$$

przy czym:

$\delta U_{B\mathcal{G}B}(I)$  – względny spadek napięcia na akumulatorze przy obciążeniu go prądem  $I$

$$\delta U_{B\mathcal{G}B}(I) = \frac{U_{B\mathcal{G}B}(0) - U_{B\mathcal{G}B}(I)}{U_{B\mathcal{G}B}(0)}, \quad (11)$$

$U_{B\mathcal{G}B}(I)$  – napięcie na zaciskach akumulatora obciążonego prądem  $I$ , w temperaturze  $\mathcal{G}_B$ . Wartość  $U_{B\mathcal{G}B}(I)$  wyznacza się z charakterystyki napięciowo-prądowej akumulatora (rys. 1),

$e_{\mathcal{G}B}(k(I))$  – siła elektromotoryczna jednego ogniwa akumulatora przy stopniu naładowania  $k(I)$  w temperaturze  $\mathcal{G}_B$ ,

$b_{\mathcal{G}B}(k(I))$  – współczynnik określający względną zmianę siły elektromotorycznej ogniwa w temperaturze  $\mathcal{G}_B$  przy stopniu naładowania  $k(I)$ .

Stopień naładowania akumulatora

$$k(I) = k_p \cdot \frac{Q_{p,9B}}{Q_{9Bn}} - \frac{1}{Q_{9Bn}} \cdot \int_0^t I^{n_p} dt = k_p \cdot \frac{Q_{p,9B}}{Q_{9Bn}} - \frac{1}{Q_{9Bn}} \cdot I^{n_p} \cdot t, \quad (12)$$

Zależność (12) różni się od zależności (4) tym, że prąd rozładowania akumulatora  $I$  ma wartość stałą. Jest to wartość prądu, przy której określa się względny spadek napięcia  $\delta U_B$ ,

Korzystając z równań (5) i (11) otrzymano końcową zależność określającą wartość chwilową rezystancji wewnętrznej akumulatora

$$\begin{aligned} R_{B,9B}(i(t), k(t)) &= \frac{l}{k(t)} + \frac{n_o \cdot b_{9B}(k(t)) \cdot e_{9B}(k(t))}{i(t)} \\ &= \frac{n_o \cdot e_{9B}(k(I)) \cdot |\delta U_{B,9B}(I) - b_{9B}(k(I))| \cdot k(I)}{kI} + \frac{n_o \cdot b_{9B}(k(t)) \cdot e_{9B}(k(t))}{i(t)}, \end{aligned} \quad (13)$$

przy czym:

- $e_{9B}(k)$  – określa zależność (6),  $\delta U_{B,9B}(I)$  – określa zależność (11),
- $b_{9B}(k(t))$  – określa zależność (8),  $k(t)$  – określa zależność (4),
- $k(I)$  – określa zależność (12).

Po uwzględnieniu (6) wartość chwilowa siły elektromotorycznej akumulatora

$$e_{B,9B}(k(t)) = n_o \cdot e_{9B}(k(t)) = n_o \cdot (E_{\min} + \Delta U \cdot k(t) + \alpha_e \cdot (g_B - g_{Bn})), \quad (14)$$

przy czym:

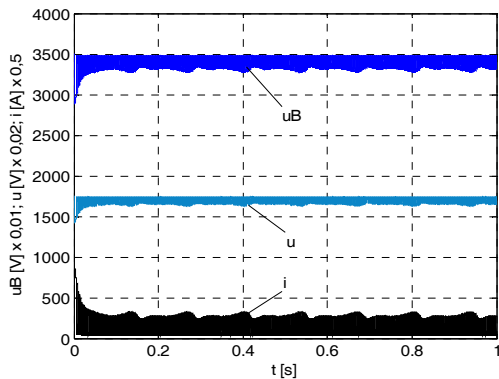
- $\Delta U$  – określa zależność (7),
- $\alpha_e$  – określa zależność (9),
- $k(t)$  – określa zależność (4).

Wprowadzenie zależności (13) i (14) do modelu matematycznego układu: akumulator–przekształtnik–silnik BLDC–przekładnie mechaniczne–silnik spalinowy umożliwia uwzględnienie wpływu zmiany parametrów akumulatora na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie oraz na charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika. Pełny model matematyczny analizowanego układu elektromechanicznego przedstawiono w [2].

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

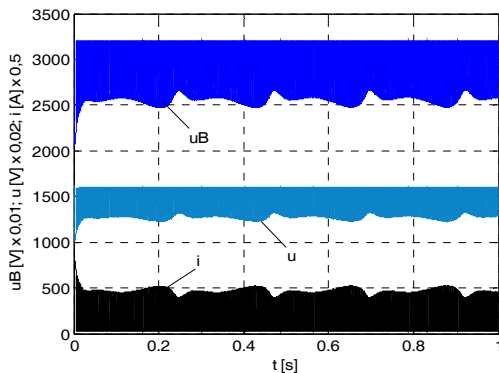
Korzystając z opracowanego modelu matematycznego, algorytmu i programu obliczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator–rozsuszniak samochodowy z silnikiem BLDC–przekładnie mechaniczne–silnik spalinowy. Obliczenia wykonano na przykładzie układu z opracowanym rozsuszniakiem





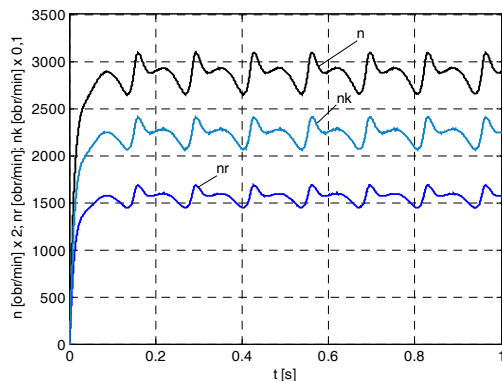
Rys. 4. Przebiegi czasowe napięcia  $u_B$  na akumulatorze, napięcia  $u$  na przekształtniku oraz prądu  $i$  pobieranego z akumulatora,  $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4. Transients of the battery voltage  $u_B$ , the converter voltage  $u$  and the battery current  $i$ ,  $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



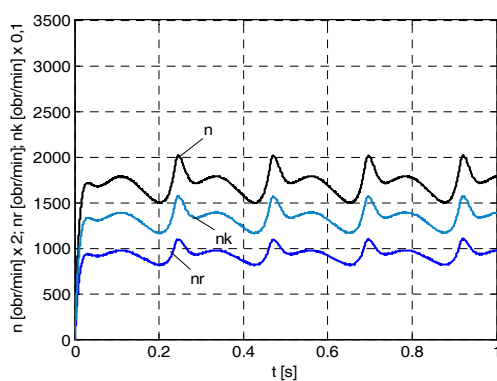
Rys. 5. Przebiegi czasowe napięcia  $u_B$  na akumulatorze, napięcia  $u$  na przekształtniku oraz prądu  $i$  pobieranego z akumulatora,  $Q_n = 60\text{Ah}$ ,  $g = (-40) \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 5. Transients of the battery voltage  $u_B$ , the converter voltage  $u$  and the battery current  $i$ ,  $Q_n = 60\text{Ah}$ ,  $g = (-40) \text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 6. Przebiegi czasowe prędkości obrotowych:  $n$  – silnika,  $n_r$  – rozrusznika,  $n_k$  – wału korbowego,  $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

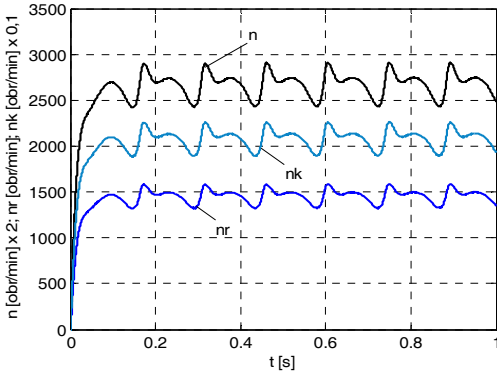
Fig. 6. Transients of the rotational speed of: the motor  $n$ , the starter  $n_r$  and the combustion engine crankshaft  $n_k$ ,  $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



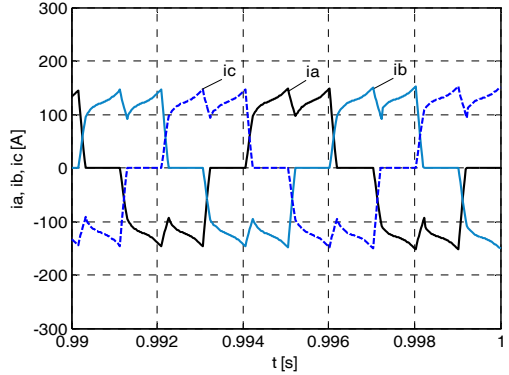
Rys. 7. Przebiegi czasowe prędkości obrotowych:  $n$  – silnika,  $n_r$  – rozrusznika,  $n_k$  – wału korbowego,  $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = (-40) \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 7. Transients of the rotational speed of: the motor  $n$ , the starter  $n_r$  and the combustion engine crankshaft  $n_k$ ,  $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = (-40) \text{ }^\circ\text{C}$

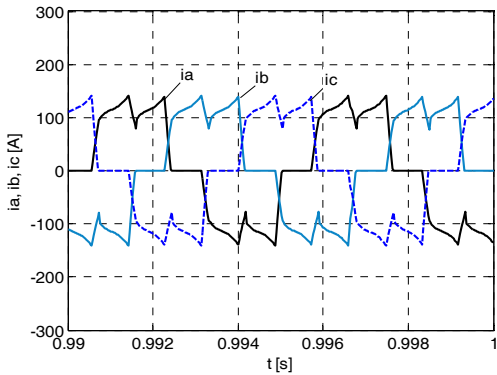
z silnikiem BLDC o danych: moc znamionowa (maksymalna)  $P_n = 3 \text{ kW}$ , napięcie znamionowe  $U_n = 36 \text{ V}$ , prędkość obrotowa przy mocy maksymalnej  $n_n = 3700 \text{ obr/min}$ . Parametry te dotyczą zasilania akumulatorem o pojemności znamionowej  $Q_n = 60 \text{ Ah}$



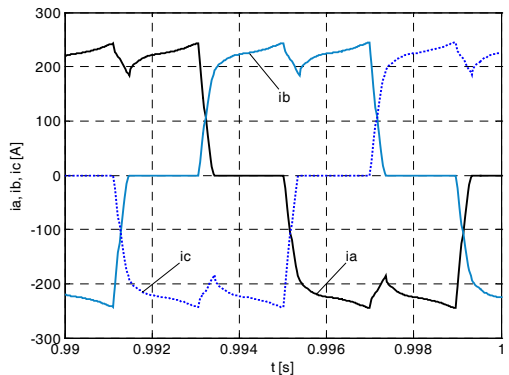
Rys. 8. Przebiegi czasowe prędkości obrotowych:  
 $n$  – silnika,  $n_r$  – rozrusznika,  $n_k$  – wału korbowego,  
 $Q_n = 30 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Fig. 8. Transients of the rotational speed of:  
 the motor  $n$ , the starter  $n_r$ ,  
 and the combustion engine crankshaft  $n_k$ ,  
 $Q_n = 30 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 9. Przebiegi czasowe prądów pasmowych,  
 $Q_n = 30 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Fig. 9. Transients of the phases currents,  
 $Q_n = 30 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

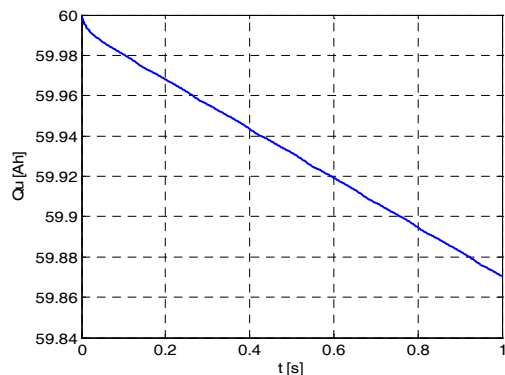


Rys. 10. Przebiegi czasowe prądów pasmowych,  
 $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Fig. 10. Transients of the phases currents,  
 $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 11. Przebiegi czasowe prądów pasmowych,  
 $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = (-40) \text{ }^\circ\text{C}$   
 Fig. 11. Transients of the phases currents,  
 $Q_n = 60 \text{ Ah}$ ,  $g = (-40) \text{ }^\circ\text{C}$

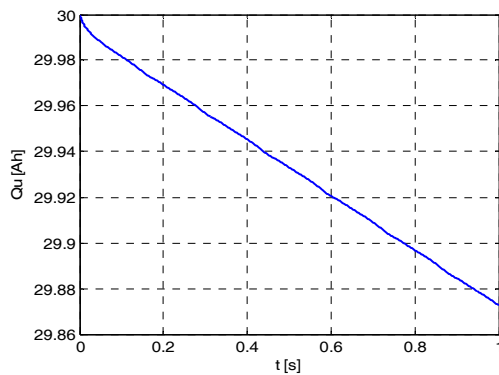
w temperaturze  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Analizę obliczeniową wykonano dla układu z czterocylindrowym silnikiem spalinowym, o zapłonie samoczynnym, o pojemności skokowej  $1500 \text{ cm}^3$ . Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 4–13. Założono, że początkowy stopień naładowania akumulatora  $k_p = 1$ , a temperatura akumulatora  $g_B$ , silnika rozrusznika  $g$  oraz silnika spalinowego  $g_s$  są takie same jak temperatura otoczenia  $g_o = g_B = g = g_s$ .



Rys. 12. Pojemność użyteczna akumulatora w funkcji czasu pracy rozrusznika,

$$Q_n = 60 \text{ Ah}, \vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fig. 12. Transient of the instantaneous value of the battery capacity  $Q_u$ ;  $Q_n = 60 \text{ Ah}, \vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

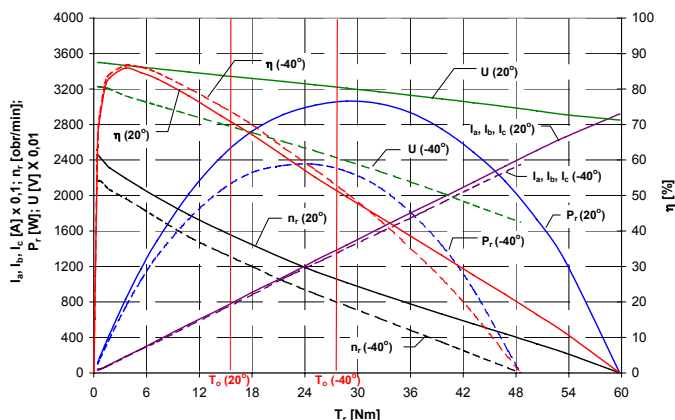


Rys. 13. Pojemność chwilowa akumulatora w funkcji czasu pracy rozrusznika,

$$Q_n = 30 \text{ Ah}, \vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

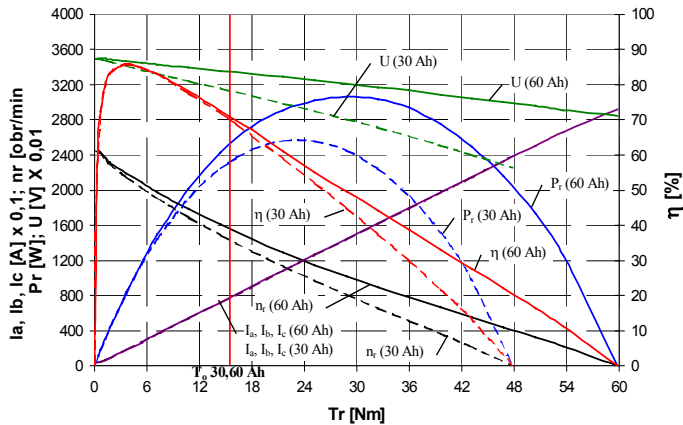
Fig. 13. Transient of the instantaneous value of the battery capacity  $Q_u$ ;  $Q_n = 30 \text{ Ah}, \vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Na podstawie wykonanych obliczeń przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie, przy różnych zadanych wartościach momentu obciążenia, wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne analizowanego rozrusznika. Charakterystyki elektromechaniczne przedstawiono na rysunkach 14 i 15. Pionową linią oznaczono, wyznaczone z przebiegów czasowych, punkty pracy ustalonej układu: akumulator–rozrusznik–silnik spalinowy.



Rys. 14. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika w temperaturze  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  oraz w  $(-40) \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $n_r$  – prędkość obrotowa rozrusznika,  $I_a, I_b, I_c$  – prądy pasmowe rozrusznika,  $U$  – napięcie na rozruszniku,  $\eta$  – sprawność rozrusznika,  $P_r$  – moc mechaniczna rozrusznika;  $Q_n = 60 \text{ Ah}$

Fig. 14. Electromechanical characteristics of the starter at temperature  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $(-40) \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $n_r$  – rotational speed of the starter,  $I_a, I_b, I_c$  – phases currents of the starter,  $U$  – input voltage of the starter converter,  $\eta$  – efficiency of the starter,  $P_r$  – mechanical power of the starter;  $Q_n = 60 \text{ Ah}$



Rys. 15. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika przy pojemnościach znamionowych akumulatora  $Q_n = 30$  Ah oraz  $Q_n = 60$  Ah; temperatura otoczenia  $\vartheta_o = 20$  °C; oznaczenia jak na rysunku 14

Fig. 15. Electromechanical characteristics of the starter at capacity of the battery  $Q_n = 30$  Ah and  $Q_n = 60$  Ah, temperature  $\vartheta_o = 20$  °C; symbols the same as in Fig. 14

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW, PODSUMOWANIE

Przy wyznaczaniu przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych rozruszników samochodowych konieczne jest uwzględnienie zmian siły elektromotorycznej, rezystancji wewnętrznej oraz pojemności chwilowej akumulatora zasilającego. Parametry te zależą od jego stopnia naładowania, wartości chwilowej prądu obciążenia, temperatury otoczenia oraz od pojemności znamionowej. W celu wyznaczenia wpływu tych czynników na pracę rozrusznika samochodowego z silnikiem BLDC opracowano model matematyczny oraz program do wyznaczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie akumulator-rozrusznik samochodowy z silnikiem BLDC–silnik spalinowy.

Wykonana analiza obliczeniowa wykazała, że:

- pojemność użyteczna akumulatora w temperaturze  $(-40)$  °C jest o 36% mniejsza niż w temperaturze  $20$  °C,
- wartość średnia napięcia na rozruszniku w temperaturze  $(-40)$  °C jest o 27,5% mniejsza niż w temperaturze  $20$  °C (rys. 4, 5, 14). Wynika to ze zmniejszenia w temperaturze ujemnej wartości siły elektromotorycznej akumulatora, wzrostu jego rezystancji wewnętrznej oraz z większego poboru prądu z akumulatora (rys. 4, 5, 14) wynikającego z większego (o 79%) momentu obciążenia silnika rozrusznika. Wzrost momentu obciążenia w temperaturze  $(-40)$  °C wynika z po-

nadpięciokrotnego wzrostu momentu tarcia w silniku spalinowym, spowodowanego zwiększoną lepkością oleju. W konsekwencji następuje wzrost wartości prądów pasmowych silnika rozrusznika (rys. 10, 11, 14) zwiększenie spadków napięć na przekształtniku, silniku elektrycznym i na akumulatorze oraz zmniejszenie prędkości obrotowej rozrusznika o 48% (rys. 6, 8),

- praca rozrusznika w temperaturze 150 °C (w stosunku do 20 °C) charakteryzuje się praktycznie taką samą wartością momentu tarcia (zmniejszenie o 1%) oraz taką samą średnią wartością momentu kompresji i dekompresji gazów (zmniejszenie zaledwie o 0,5%). Wzrost temperatury z 20 °C do 150 °C powoduje zmniejszenie wartości średniej prędkości obrotowej rozrusznika o 5%. Zmiana prędkości obrotowej wynika ze zmiany prądu obciążenia, rezystancji wewnętrznej i siły elektromotorycznej akumulatora, zmiany rezystancji przewodów łączących, rezystancji uzwojenia silnika oraz zmiany strumienia magnetycznego,
- moc maksymalna rozrusznika w temperaturze otoczenia  $\vartheta_o = (-40)$  °C jest mniejsza o 23% niż w temperaturze 20 °C. Główną przyczyną jest mniejsza wartość siły elektromotorycznej akumulatora oraz jego większa rezystancja wewnętrzna w temperaturze (-40) °C (rys. 14). W temperaturze 150 °C pomimo większej wartości napięcia na akumulatorze moc maksymalna rozrusznika jest mniejsza o 18,6% niż w temperaturze 20 °C. Spowodowane jest to większą wartością rezystancji uzwojenia silnika elektrycznego i przewodów zasilających, czyli większymi stratami mocy. Sprawność rozrusznika w temperaturze 150 °C (w odniesieniu do 20 °C) jest o 17,5% mniejsza,
- sprawność rozrusznika w temperaturze (-40) °C jest o 25% mniejsza niż w temperaturze 20 °C (rys. 14). Wynika to ze wzrostu momentu obciążenia rozrusznika, spowodowanego wzrostem lepkości oleju, co skutkuje większą wartością prądów pasmowych oraz większymi stratami mocy w silniku i przekształtniku,
- zasilanie rozrusznika akumulatorem o mniejszej pojemności powoduje zmniejszenie wartości średniej napięcia na akumulatorze, zmniejszenie prędkości obrotowej, mocy i sprawności rozrusznika (rys. 7, 15). Spowodowane jest to większą rezystancją wewnętrzną akumulatora o mniejszej pojemności znamionowej. Wartość średnia napięcia na rozruszniku, przy zasilaniu akumulatorem o pojemności 30 Ah, jest o 7% mniejsza niż przy zasilaniu akumulatorem o pojemności 60 Ah (rys. 15). Skutkiem tego jest zmniejszenie prędkości obrotowej rozrusznika o 7% (rys. 6, 7, 15).

Opracowany model matematyczny, algorytm i program obliczeń umożliwiają wyznaczanie przebiegów czasowych oraz charakterystyk elektromechanicznych rozrusznika samochodowego z silnikiem BLDC z uwzględnieniem między innymi zmiany parametrów chwilowych akumulatora spowodowanych: zmianą temperatury, stopnia naładowania, pojemności oraz prądu obciążenia.

## LITERATURA

- [1] BERNDT D., *Maintenance-free batteries: lead-acid, nickel/cadmium, nickel/hydride: a handbook of battery technology*, Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England; John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore 1997.
- [2] CIURYS M., *Analiza pracy bezszczotkowego silnika prądu stałego przy zmiennym obciążeniu na przykładzie rozrusznika samochodowego*, Raport Inst. Masz. Napęd. Pomiarów Elektr. PWr., 2009, Ser. PRE nr 4, Rozprawa doktorska (promotor Ignacy Dudzikowski), Wrocław 2009.
- [3] CIURYS M., DUDZIKOWSKI I., GIERAK D., *Modelling of a car starter with permanent magnet commutator motor*, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 28, No. 3, 2009, 722–729.
- [4] CZERWIŃSKI A., *Akumulatory, baterie, ogniwa*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.
- [5] DUDZIKOWSKI I., OZIOM J., JANISZEWSKI S., *Stany dynamiczne w rozrusznikach samochodowych wzbudzanych magnesami trwałymi*, 39th International Symposium on Electrical Machines SME 2003, Gdańsk–Jurata 2003.
- [6] DUDZIKOWSKI I., SALAMON J., GIERAK D., *Dynamic and Stationary Operating States of Motor-Car Starters Excited by Permanent Magnets*, Sixth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical System UEES '04, Alushta, Ukraine, 2004, 59–70.
- [7] EMADI A., *Handbook of automotive power electronics and motor drives*, Taylor & Francis, 2005.
- [8] KOZIEJ E., *Maszyny elektryczne pojazdów samochodowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
- [9] MYSŁOWSKI J.: *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*, WNT, Warszawa 1996.
- [10] NICASTRI P.R., HUANG H., *Jump Starting 42V PowerNet Vehicles*, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 15, No. 8, Aug. 2000, 25–31.
- [11] SĘK A., POLAKOWSKI K., *Analiza pola magnetycznego w rozruszniku samochodowym z magnesami trwałymi i przekładnią planetarną*, Przegląd Elektrotechniczny, 7–8/2004, 702–705.
- [12] SZUMANOWSKI A., *Akumulacja energii w pojazdach*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984.
- [13] SZUMANOWSKI A., *Hybrid electric vehicle Drives Design- Edition based on URBAN BUSES*, Publishing and Printing House of the Institute for Sustainable Technologies, Radom 2007.

ANALYSIS OF THE BATTERY PARAMETERS INFLUENCE  
ON THE OPERATION OF THE CAR STARTER WITH BLDC MOTOR

Mathematical model of a lead-acid battery was presented. It takes into account the influence of the: ambient temperature, nominal capacity of the battery, value of the current as well as the battery charge ratio on the battery parameters (electromotive force, internal resistance, instantaneous value of the battery capacity). Transients of the electrical and mechanical quantities in the system: battery–car starter with a brushless DC motor–combustion engine were computed by the use of the developed mathematical model. Electromechanical characteristics of the starter were determined. The computations were performed for a different ambient temperature and for different battery nominal capacity.