

**Marek Ciurys, Ignacy Dudzikowski**  
Politechnika Wroclawska  
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

## **ANALIZA DYNAMICZNYCH I STACJONARNYCH STANÓW PRACY ROZRUSZNIKA SAMOCHODOWEGO WZBUDZANEGO MAGNESAMI TRWAŁYMI**

### **ANALYSIS OF THE DYNAMIC AND STATIONARY STATES OF A CAR STARTER WITH PERMANENT MAGNET MOTOR**

**Streszczenie:** Metodą polowo-obwodową wyznaczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i magnetycznych w opracowanym silniku rozrusznika samochodowego z magnesami ferrytowymi w dynamicznych i ustalonych stanach pracy. Wyniki te wykorzystano w opracowanym modelu matematycznym, algorytmie i programie do wyznaczania przebiegów wielkości mechanicznych i elektrycznych w układzie: akumulator – silnik elektryczny – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy. Wyznaczone przebiegi czasowe w analizowanym układzie elektromechanicznym uwzględniają zmienność momentu bezwładności i zmienność momentu obciążenia generowanego przez silnik spalinowy oraz wpływ temperatury na parametry akumulatora, parametry magnesów i na moment obciążenia generowany przez silnik spalinowy. Wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika.

**Abstract:** Using field – circuit method transients of the electric and magnetic quantities of the developed car starter motor with ferrite magnets were determined at dynamic and stationary operating conditions. These results were used, in the developed mathematical model, algorithm and software, to determine mechanical and electrical transient in the system: battery – electrical motor – mechanical transmissions – combustion engine. Transients of the analysed electromechanical system were determined taking into account the variations of inertia, the variations of the load torque generated by combustion engine and the influence of the temperature on the battery parameters, magnets parameters and load torque generated by the combustion engine. Electromechanical characteristics of the car starter were determined.

**Słowa kluczowe:** *maszyny elektryczne, rozruszniki samochodowe, magnesy trwałe, przebiegi czasowe*  
**Keywords:** *electrical machines, car starters, permanent magnets, transients*

#### **1. Wstęp**

Rozruszniki samochodowe stosowane są w celu nadania wałowi korbowemu silnika spalinowego prędkości obrotowej, przy której zaczyna się regularny proces zapłonu. Dla silników z zapłonem iskrowym wynosi ona od 40 do 70 obr/min, a dla silników z zapłonem samoczynnym od 80 do 200 obr/min.

Rozruszniki ze wzbudzeniem elektromagnetycznym są wypierane przez rozruszniki z magnesami trwałymi (najczęściej ze względu na cenę – ferrytowymi), które są zwykle wyposażone w przekładnię planetarną zwiększającą moment i zmniejszającą prędkość obrotową zębniaka rozrusznika. Rozruch silników spalinowych jest złożonym procesem elektromechanicznym podczas którego zmieniają się wielkości elektryczne i mechaniczne w układzie: akumulator – silnik elektryczny – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy. Dlatego w analizie pracy

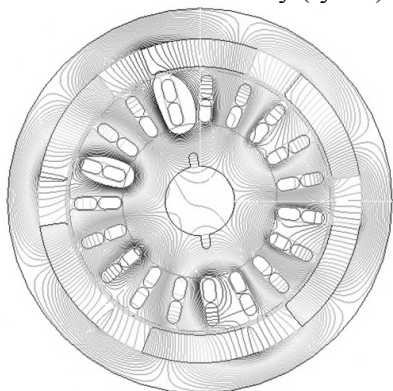
rozruszników samochodowych konieczne jest uwzględnienie wpływu temperatury otoczenia, zmienności parametrów akumulatora [4] zasilającego rozrusznik, zmienności momentu obciążenia generowanego przez silnik spalinowy [5] oraz zmienności momentu bezwładności układu: rozrusznik – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy.

Celem pracy jest wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w opracowanym rozruszniku samochodowym z magnesami ferrytowymi w dynamicznych i ustalonych stanach pracy oraz wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych rozrusznika.

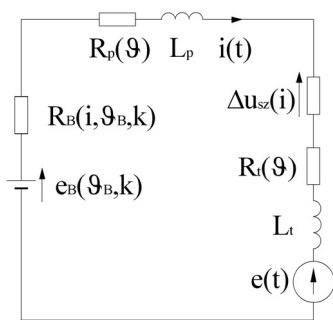
#### **2. Analizowany układ elektromechaniczny**

W analizie obliczeniowej procesu rozruchu silnika spalinowego należy uwzględnić cały układ elektromechaniczny, czyli: obwód

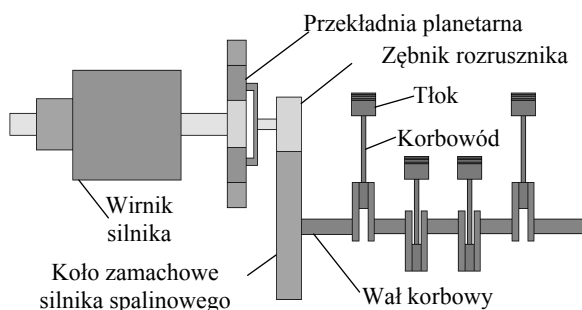
magnetyczny silnika (rys. 1), układ elektryczny (rys. 2) oraz układ mechaniczny (rys. 3).



Rys. 1. Rozptył strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym silnika w stanie obciążenia ;  $\theta=20^{\circ}\text{C}$



Rys. 2. Schemat układu elektrycznego:  
 $e_B(\theta_B, k)$  – siła elektromotoryczna akumulatora,  
 $R_B(i, \theta_B, k)$  – rezystancja wewnętrzna akumulatora,  $R_p(\theta)$  – rezystancja przewodów łączących akumulator z rozrusznikiem,  $L_p$  – indukcyjność przewodów łączących akumulator z rozrusznikiem,  $\Delta u_{sz}(i)$  – spadek napięcia na szczotkach,  $R_t(\theta)$  – rezystancja uzwojenia twornika,  $L_t$  – indukcyjność uzwojenia twornika,  $e(t)$  – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika



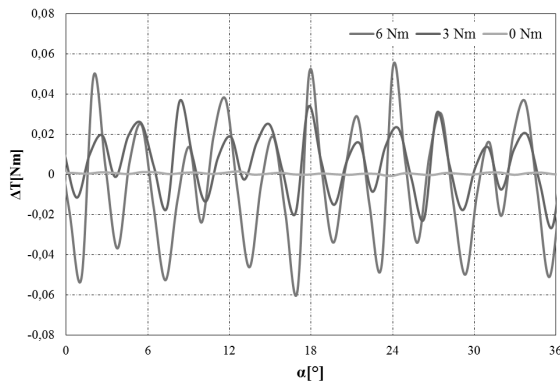
Rys. 3. Schemat układu mechanicznego

Obwód magnetyczny silnika (składa się z wirnika, w którym umieszczone jest uzwojenie oraz stojana z magnesami trwałymi.

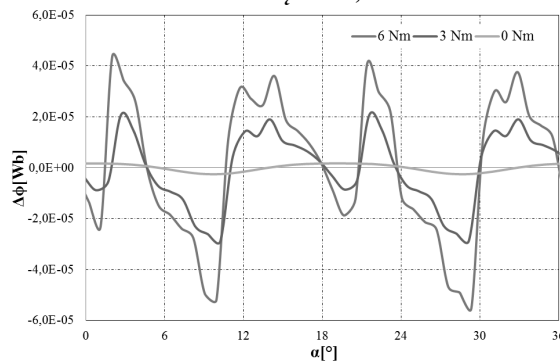
Układ elektryczny składa się z akumulatora, przewodów łączących oraz uzwojenia silnika. W skład układu mechanicznego wchodzi wirnik silnika elektrycznego, przekładnia planetarna, zębniak rozrusznika, koło zamachowe oraz wał korbowy silnika spalinowego. Elementy te poruszają się ruchem obrotowym. Tłoki i korbowody silnika spalinowego poruszają się ruchem posuwisto – zwrotnym. Dostępne komercyjne oprogramowanie nie umożliwia analizy układów elektromechanicznych o zmiennym momencie bezwładności i zmiennym momencie obciążenia, co jest specyfiką pracy rozruszników samochodowych. Z tego względu konieczne było opracowanie modelu matematycznego, algorytmu oraz programu w środowisku Matlab do wyznaczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – silnik elektryczny – przekładnie mechaniczne – silnik spalinowy. Dokładnie omówiono je w pracach [1, 2].

### 3. Wyniki obliczeń polowo – obwodowych silnika elektrycznego

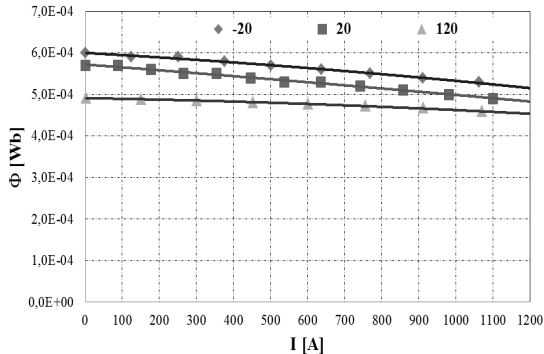
Analizę obliczeniową przeprowadzono na przykładzie opracowanego rozrusznika samochodowego z magnesami ferrytowymi o mocy  $P_r=3,7\text{ kW}$  i prędkości obrotowej  $n_r=1500\text{ obr/min}$ . Parametry te dotyczą temperatury  $20^{\circ}\text{C}$  oraz maksymalnej mocy rozrusznika (rys. 19). Korzystając z opracowanego modelu polowo – obwodowego silnika wyznaczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych silnika w różnej temperaturze, przy różnych, zadanych wartościach momentu obciążenia. Na ich podstawie wyznaczono zależności pulsacji momentu elektromagnetycznego oraz strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej od kąta obrotu wirnika (rys. 4, 5) przy różnym momencie obciążenia silnika, w różnej temperaturze. Wyznaczono również zależność strumienia magnetycznego od prądu twornika w różnej temperaturze (rys. 6). Wyniki uzyskane metodą polowo – obwodową posłużyły jako parametry wejściowe równań opracowanego modelu matematycznego, algorytmu oraz programu do wyznaczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – silnik elektryczny z magnesami ferrytowymi – przekładnie planetarne – silnik spalinowy.



Rys. 4. Pulsacje momentu w stanie ustalonym jako funkcja kąta obrotu wirnika przy różnej wartości momentu obciążenia;  $\theta=20^{\circ}\text{C}$



Rys. 5. Pulsacje strumienia magnetycznego w stanie ustalonym jako funkcja kąta obrotu wirnika przy różnej wartości momentu obciążenia;  $\theta=20^{\circ}\text{C}$

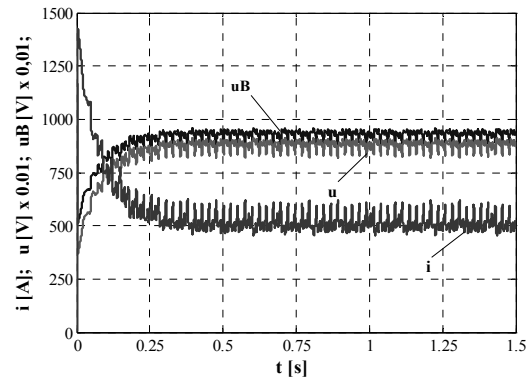


Rys. 6. Zależność wartości średniej strumienia magnetycznego od prądu obciążenia;  $\theta=-20^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $120^{\circ}\text{C}$

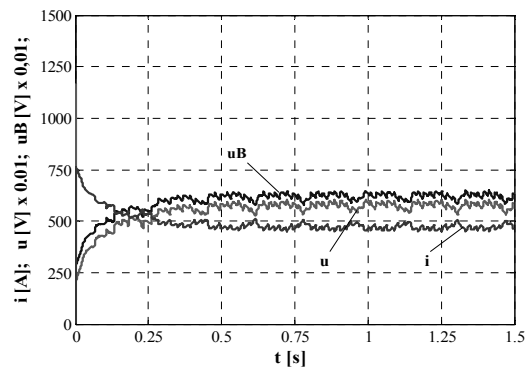
#### 4. Przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – rozrusznik – samochodowy – silnik spalinowy

Korzystając z opracowanego modelu matematycznego, algorytmu i programu [1, 2] obliczono przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w analizowanym układzie elektro-mechanicznym. Przedstawione na rysunkach 7

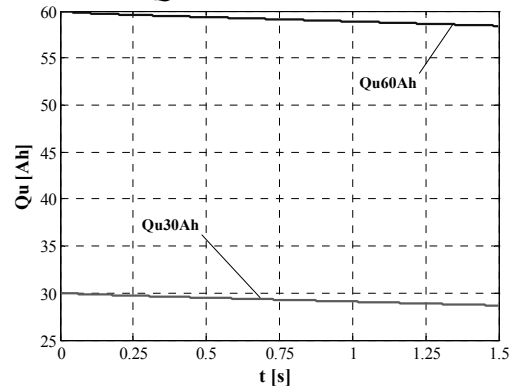
– 18 przykładowe przebiegi czasowe dotyczą zasilania układu akumulatorem o napięciu 12 V, pojemności znamionowej  $Q_n=30$  oraz 60 Ah w temperaturze otoczenia  $\theta=20^{\circ}\text{C}$ . Pojemność skokowa silnika spalinowego wynosiła  $V_s=1500\text{ cm}^3$ . Przebiegi czasowe przedstawione na rysunkach 15 – 18 są sprowadzone na wał silnika elektrycznego.



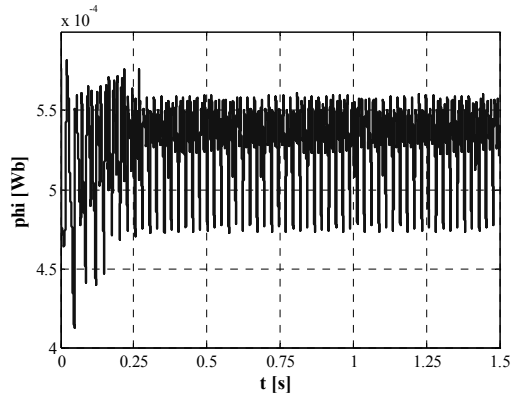
Rys. 7. Przebiegi czasowe napięcia  $u_B$  na akumulatorze, napięcia  $u$  na silniku elektrycznym oraz prądu  $i$  pobieranego z akumulatora;  $Q_n=60\text{Ah}$



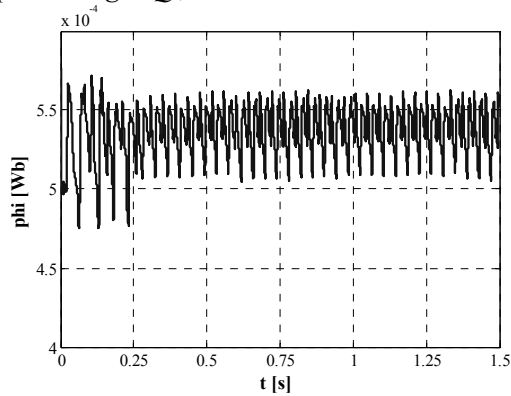
Rys. 8. Przebiegi czasowe napięcia  $u_B$  na akumulatorze, napięcia  $u$  na silniku elektrycznym oraz prądu  $i$  pobieranego z akumulatora;  $Q_n=30\text{Ah}$



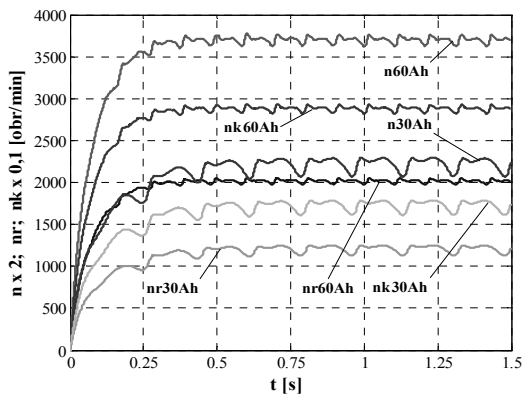
Rys. 9. Pojemność użyteczna akumulatora w funkcji czasu rozruchu silnika spalinowego;  $Q_n=30$  i  $60\text{Ah}$



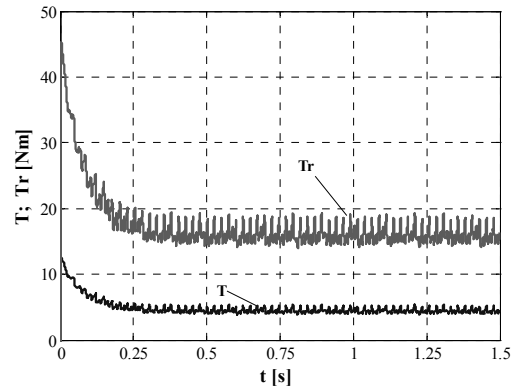
Rys. 10. Przebieg czasowy strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika elektrycznego podczas rozruchu silnika spalinowego;  $Q_n=60 \text{ Ah}$



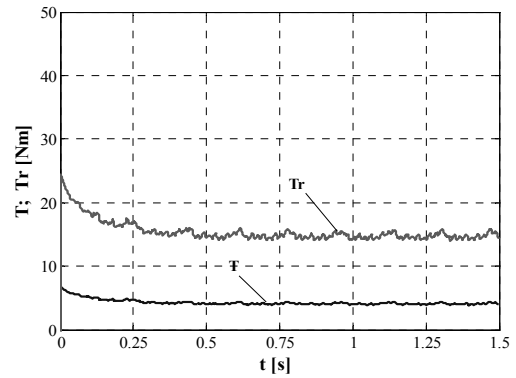
Rys. 11. Przebieg czasowy strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika elektrycznego podczas rozruchu silnika spalinowego;  $Q_n=30 \text{ Ah}$



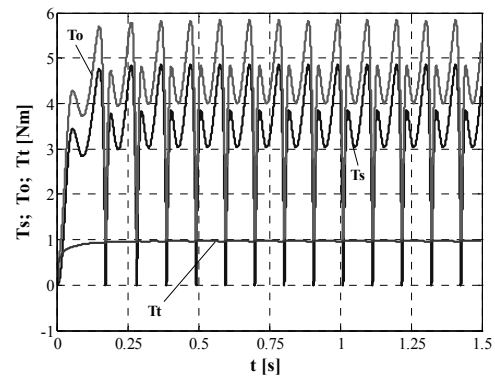
Rys. 12. Przebiegi czasowe prędkości obrotowej: silnika elektrycznego  $n$ , rozrusznika  $n_r$ , wału korbowego  $n_k$ ;  $Q_n = 30$  i  $60 \text{ Ah}$



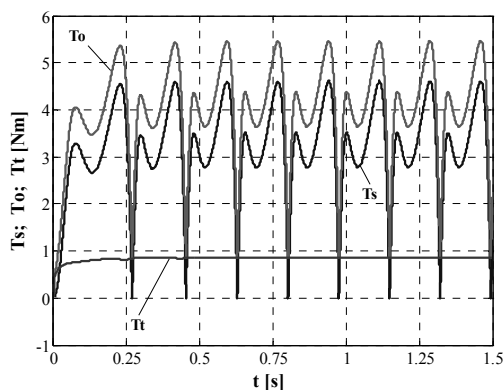
Rys. 13. Przebiegi czasowe momentu mechanicznego silnika elektrycznego  $T$  oraz momentu rozrusznika  $T_r$ ;  $Q_n = 60 \text{ Ah}$



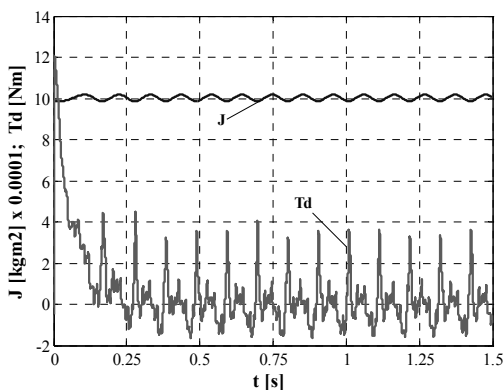
Rys. 14. Przebiegi czasowe momentu mechanicznego silnika elektrycznego  $T$  oraz momentu rozrusznika  $T_r$ ;  $Q_n = 30 \text{ Ah}$



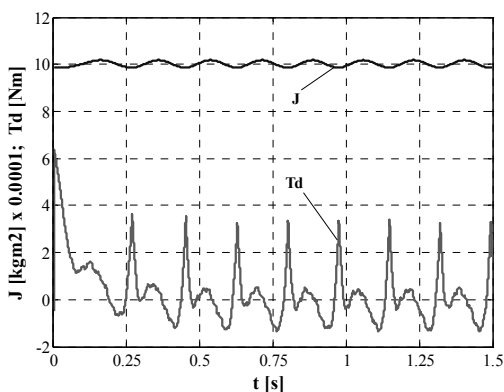
Rys. 15. Przebiegi czasowe momentów generowanych przez silnik spalinowy:  $T_t$  - tarcia,  $T_s$  -kompresji i dekompresji,  $T_o$  - sumarycznego;  $Q_n = 60 \text{ Ah}$



Rys. 16. Przebiegi czasowe momentów generowanych przez silnik spalinowy:  $T_t$  – tarcia,  $T_s$  – kompresji i dekompresji,  $T_o$  – sumarycznego;  $Q_n = 30 \text{ Ah}$



Rys. 17. Przebiegi czasowe momentu dynamicznego  $T_d$  oraz całkowitego momentu bezwładności układu  $J$  sprowadzonych na wał silnika elektrycznego;  $Q_n = 60 \text{ Ah}$

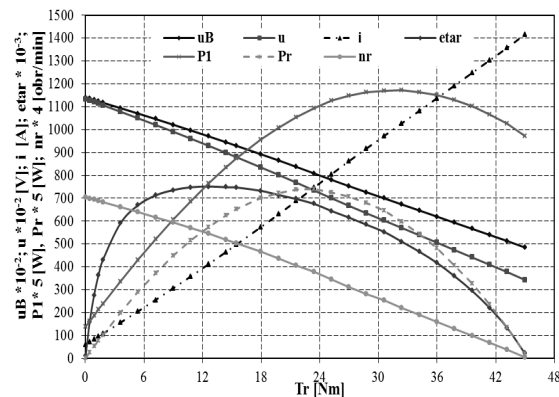


Rys. 18. Przebiegi czasowe momentu dynamicznego  $T_d$  oraz całkowitego momentu bezwładności układu  $J$  sprowadzonych na wał silnika elektrycznego;  $Q_n = 30 \text{ Ah}$

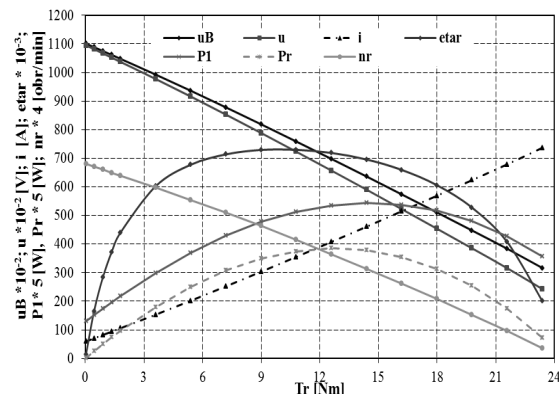
## 5. Charakterystyki elektromechaniczne

Na podstawie wykonanych obliczeń przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie, przy różnych

zadanych wartościach momentu obciążenia, wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika. Przedstawiono je na rysunkach 19 – 20.



Rys. 19. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika;  $\vartheta = 20^\circ \text{C}$ ;  $Q_n = 60 \text{ Ah}$



Rys. 20. Charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika;  $\vartheta = 20^\circ \text{C}$ ;  $Q_n = 30 \text{ Ah}$

## 6. Analiza wyników

W ustalonym stanie pracy (przy stałej wartości napięcia zasilania oraz stałej wartości momentu obciążenia) przebiegi czasowe siły elektromotorycznej, strumienia magnetycznego, prądu twornika i momentu elektromagnetycznego silnika elektrycznego mają charakter pulsujący. Ze zmianą obciążenia silnika zmieniają się skutki działania strumienia wytworzonego przez uzwojenie twornika, co przenosi się na wartości średnie przebiegów i ich pulsacje. W stanie jałowym pulsacje strumienia wynoszą 0,75 % jego wartości średniej, natomiast w stanie obciążenia momentem znamionowym ich wartość dochodzi do 20 %. Wzrost pulsacji strumienia ze wzrostem obciążenia silnika spowodowany jest wzrostem pulsacji prądu twornika i wzrostem przepływu zezwojów komutujących.

Wartość względna pulsacji momentu elektromagnetycznego przy obciążeniu znamionowym wynosi 2 %. Zmiana wartości średniej strumienia magnetycznego spowodowana zmianą prądu twornika (rys. 6), w odniesieniu do stanu bezprądowego, w zależności od temperatury wynosi 8 – 16 %.

Zmiana strumienia magnetycznego spowodowana zmianą temperatury od (-20)°C do 120°C wynosi 18 %, co wynika z ujemnej wartości temperaturowego współczynnika indukcji remanentu magnesów.

Podczas rozruchu silnika spalinowego w przebiegach czasowych prądu, napięcia, strumienia i momentu silnika występują zarówno pulsacje o częstotliwości wynikającej z cyklu pracy silnika spalinowego oraz pulsacje wynikające ze złożkowania wirnika (rys. 7, 8, 10, 11, 13, 14). Udział momentu tarcia silnika spalinowego w całkowitym momencie obciążenia rozrusznika w temperaturze 20 °C wynosi 21 – 22 % (rys. 15, 16).

Zasilanie rozrusznika akumulatorem o mniejszej pojemności powoduje zmniejszenie wartości średniej napięcia na akumulatorze, zmniejszenie prędkości obrotowej oraz mocy rozrusznika (rys. 19, 20). Spowodowane jest to większą rezystancją wewnętrzną akumulatora. Wartość napięcia na silniku, zasilanym z akumulatora o pojemności 30 Ah, jest o 34,7 % mniejsza niż przy zasilaniu akumulatorem o pojemności 60 Ah (rys. 7, 8, 19, 20). Skutkiem tego jest zmniejszenie prędkości obrotowej rozrusznika o 40 % (rys. 12, 19, 20).

Zarówno przy zasilaniu opracowanego rozrusznika z akumulatora o pojemności 30 jak i 60 Ah wał korbowy osiągnął prędkość gwarantującą skuteczny rozruch silnika spalinowego. Świadczy to o poprawności zaprojektowanego rozrusznika i jego przydatności do rozruchu silników samochodowych.

## 7. Podsumowanie

Opracowano rozrusznik samochodowy z magnesami trwałymi oraz jego model polowo – obwodowy. Obliczono przebiegi czasowe wielkości magnetycznych, elektrycznych i mechanicznych silnika elektrycznego przy różnym obciążeniu w różnej temperaturze. Wyniki obliczeń polowo – obwodowych wykorzystano jako parametry równań

opracowanego modelu matematycznego, algorytmu i programu obliczeń przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – rozrusznik samochodowy – silnik spalinowy. Wyznaczono przebiegi czasowe w tym układzie w stanach dynamicznych i stacjonarnych uwzględniając: pulsacje pochodzenia elektromagnetycznego występujące w silniku elektrycznym, straty mechaniczne oraz straty w żelazie silnika elektrycznego, zmianę parametrów akumulatora jako funkcję prądu, czasu i temperatury, zmienność momentu obciążenia generowanego przez silnik spalinowy oraz zmienność momentu bezwładności układu. Wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne rozrusznika przy zasilaniu akumulatorem o pojemności 30 oraz 60 Ah. Opracowany model matematyczny, algorytm i program umożliwiają analizę rozruchu silników spalinowych o różnej pojemności, w różnej temperaturze otoczenia przy zastosowaniu akumulatorów o różnej pojemności.

## 8. Literatura

- [1] Dudzikowski I., Ciurys M.: *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011
- [2] 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, 2009, 28 (3), s. 722-729
- [3] 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
- [4] Pulkrabek W.: *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Prentice Hall, 2004

## Autorzy

Dr inż. Marek Ciurys, Prof. dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski,  
Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław  
Tel: 71 – 320-34-67  
marek.ciurys@pwr.wroc.pl  
ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Andrzej Pochanke