

Ignacy Dudzikowski, Marek Ciurys
 Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ANALIZA PRACY SILNIKA MAGNETOELEKTRYCZNEGO ZASILANEGO Z AKUMULATORA PRZEZ PRZEKSZTAŁTNIK IMPULSOWY

ANALYSIS OF OPERATION OF PERMANENT MAGNET COMMUTATOR MOTOR SUPPLIED BY BATTERY THROUGH PULSE CONVERTER

Abstract: The mathematical model, algorithm and computational program of the system: battery – pulse converter – permanent magnet commutator motor were developed. The program was developed in Matlab – Simulink environment. Calculations of transients of electrical and mechanical quantities during dynamic and steady states and electromechanical characteristics of the motor were carried out. Analysis of load torque, ambient temperature and battery capacity influence on transients of electrical and mechanical quantities in the system were carried out.

Circuit-field method was applied. Quantities determined using finite element method (with the help of commercial software) are used as the parameters of the mathematical model equations which define: the electromotive force, the electromagnetic torque and the iron losses.

The mathematical model, algorithm and computational program take into consideration: the dependence of the instantaneous values of battery voltage and its internal resistance on the values of the current, temperature and charge ratio; the dependence of the instantaneous values of magnetic flux and electromagnetic torque on the values of the current, temperature and rotor position; the dependence of the motor and converter power losses on the instantaneous values of the current and the pulse-frequency modulation of the converter.

1. Wstęp

Przenośne narzędzia elektryczne zapewniają większy komfort pracy i wygodę ze względu na brak przewodu zasilającego. Można je używać wszędzie tam gdzie dostęp do sieci elektrycznej jest utrudniony lub niemożliwy. Zasilane są napięciem od kilku do 36 woltów. Pojemność ich akumulatorów wynosi przeważnie od 1,2 do 3,3 Ah.

W urządzeniach przenośnych zwykle stosowane są silniki komutatorowe wzbudzone magnesami trwałymi. Charakteryzują się one dużą sprawnością, małymi wymiarami i masą oraz niskim kosztem produkcji.

Prezentowana praca dotyczy analizy układu (rys. 1) składającego się z:

- akumulatora o sile elektromotorycznej e_B oraz rezystancji wewnętrznej R_B ,
- tranzystorowego przekształtnika impulsowego,
- silnika magnetoelektrycznego o rezystancji R_t i indukcyjności uzwojenia L_t , spadku napięcia na szczotkach Δu_{sz} i rezystancji R_{Fe} odwzorowującej straty mocy w żelazie silnika spowodowane pulsacją strumienia wytworzonego przez prąd twornika.

Wartości siły elektromotorycznej, rezystancji i pojemności akumulatora zależą od jego temperatury pracy ϑ_B [1, 3, 4].

Napięcie u_B na zaciskach akumulatora zależy również od stopnia naładowania akumulatora k_B oraz od pobieranego prądu i_p .

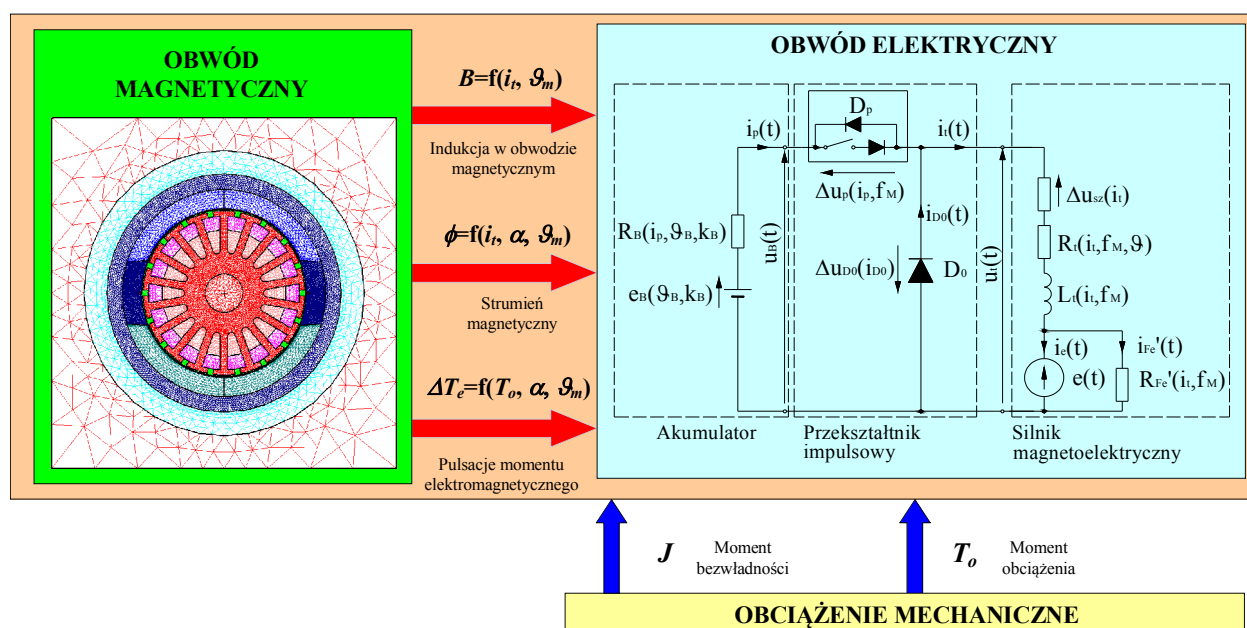
Przekształtnik impulsowy cyklicznie załącza i wyłącza napięcie akumulatora z zadaną częstotliwością modulacji f_M i współczynnikiem wypełnienia impulsów γ . Zmiana współczynnika γ umożliwia regulację średniej wartości napięcia u_t na silniku, czyli regulację prędkości obrotowej. Przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku zasilanym z przekształtnika impulsowego oraz przebieg prądu pobieranego z akumulatora zależą od temperatury ϑ_B , pojemności Q i stopnia naładowania akumulatora k_B , parametrów przekształtnika (f_M , γ) oraz wartości momentu obciążenia T_o [2]. Częstotliwość modulacji przekształtnika f_M ma wpływ na wartość rezystancji (zjawisko naskórkowości) i indukcyjności twornika (zjawisko tłumienia) oraz na przebieg i wartość skuteczną prądu silnika, a także na straty w żelazie (przy $T_o = \text{const}$).

Celem pracy jest opracowanie modelu matematycznego, algorytmu i programu do obliczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie: akumulator – przekształtnik impulsowy – silnik magnetoelektryczny oraz do wyznaczania charakterystyk elektromechanicznych silnika.

Zakres pracy obejmuje:

- opracowanie modelu matematycznego i algorytmu obliczeń układu,
- opracowanie programu w środowisku Matlab - Simulink,

- obliczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w stacjonarnych i dynamicznych stanach pracy układu oraz wyznaczanie charakterystyk ruchowych silnika,
- analizę wpływu momentu obciążenia, temperatury oraz pojemności akumulatora na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie.



Rys. 1. Ilustracja modelowanego układu

2. Model matematyczny

Na rysunku 1 poszczególne symbole oznaczają: $e_B(\mathcal{G}_B, k_B)$ – siła elektromotoryczna akumulatora zależna od stopnia naładowania k_B i temperatury akumulatora \mathcal{G}_B , $R_B(i_p, \mathcal{G}_B, k_B)$ – rezystancja wewnętrzna akumulatora, $i_p(t)$ – wartość chwilowa prądu przekształtnika, czyli prądu pobieranego z akumulatora, $u_B(t)$ – wartość chwilowa napięcia na akumulatorze, $\Delta u_p(i_p, f_M)$ – spadek napięcia na przekształtniku, uwzględniający straty mocy przewodzenia i straty przełączeniowe, $\Delta u_{Do}(i_{Do})$ – spadek napięcia na diodzie zwrotnej, $i_{Do}(t)$ – prąd diody zwrotnej, $i_e(t)$ – wartość chwilowa prądu (rys. 1) odzwierciedlająca powstawanie momentu elektromagnetycznego, $u_t(t)$ – wartość chwilowa napięcia na silniku, $i_t(t)$ – wartość chwilowa prądu twornika, $\Delta u_{sz}(i_t)$ – spadek napięcia na szczotkach, $R_l(i_t, f_M, \mathcal{G})$ – rezystancja uzwojenia twornika

zależna od prądu twornika i_t , częstotliwości modulacji przekształtnika f_M i temperatury uzwojenia \mathcal{G} , $L_l(i_t, f_M)$ – indukcyjność uzwojenia twornika zależna od prądu twornika i częstotliwości modulacji przekształtnika, $e(t)$ – wartość chwilowa siły elektromotorycznej rotacji indukowanej w uzwojeniu twornika, $i_{Fe}'(t)$ – wartość chwilowa prądu odzwierciedlającego straty mocy w żelazie spowodowane pulsacją strumienia wytworzonego przez prąd twornika, $R_{Fe}'(i_t, f_M)$ – rezystancja odwzorowująca straty mocy w żelazie spowodowane pulsacją strumienia wytworzonego przez prąd twornika. Napięcie na zaciskach akumulatora

$$u_B(i_p, \mathcal{G}_B, k_B) = e_B(\mathcal{G}_B, k_B) + R_B(i_p, \mathcal{G}_B, k_B) \cdot i_p(t) \quad (1)$$

Zależności określające wartość siły elektromotorycznej i rezystancji wewnętrznej akumulatora

ra, jako funkcję prądu, temperatury i stopnia naładowania, przedstawiono w [3, 4].

Równanie napięciowe obwodu przy załączonym przekształtniku

$$u_B(t) = e(t) + R_t(i_t, f_M, \mathcal{G}) \cdot i_t(t) + L_t(i_t, f_M) \cdot \frac{di_t(t)}{dt} + \Delta u_{sz}(i_t) + \Delta u_p(i_p, f_M). \quad (2)$$

Równanie napięciowe w stanie wyłączenia przekształtnika

$$0 = e(t) + L_t(i_t, f_M) \frac{di_t(t)}{dt} + R_t(i_t, f_M, \mathcal{G}) \cdot i_t(t) + \Delta u_{sz}(i_t) + \Delta u_{Do}(i_{Do}). \quad (3)$$

Wartość chwilowa SEM rotacji twornika

$$e(t) = \frac{p}{2\pi a} N \cdot \phi(i_t, \alpha, \mathcal{G}_m) \cdot \omega(t), \quad (4)$$

gdzie: p – liczba par biegunów, a – liczba par gałęzi równoległych uzwojenia twornika, N – liczba prętów uzwojenia twornika, $\phi(i_t, \alpha, \mathcal{G}_m)$ – strumień magnetyczny zależny od prądu twornika i_t , kąta obrotu wirnika α i temperatury magnesów \mathcal{G}_m , $\omega(t)$ – wartość chwilowa prędkości kątowej.

Wartość chwilowa momentu elektromagnetycznego silnika

$$T_e(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N \phi(i_t, \mathcal{G}_m) i_e(t) + \Delta T_e(T_o, \alpha, \mathcal{G}_m) \quad (5)$$

gdzie: $\phi(i_t, \mathcal{G}_m)$ – strumień magnetyczny zależny od prądu twornika i_t i temperatury magnesów \mathcal{G}_m , $\Delta T_e(T_o, \alpha, \mathcal{G}_m)$ – pulsacje momentu elektromagnetycznego w stanie obciążenia momentem T_o w temperaturze magnesów \mathcal{G}_m .

Zmniejszenie momentu silnika wynikające ze strat mechanicznych i strat w żelazie wirnika

$$\Delta T(\omega) = \frac{\Delta P_{Fe}(\omega) + \Delta P_{Fe}'(i_t, f_M) \cdot k(f_M)}{\omega(t)} + \frac{\Delta P_m(\omega)}{\omega(t)} \quad (6)$$

gdzie: $\Delta P_{Fe}(\omega)$ – straty mocy w żelazie spowodowane wirowaniem wirnika w polu magnesów, $\Delta P_{Fe}'(i_t, f_M)$ – straty mocy w żelazie (w stanie i wirnika) spowodowane pulsującym strumieniem oddziaływania twornika, $\Delta P_m(\omega)$ –

straty mechaniczne silnika, $k(f_M)$ – współczynnik określający udział strat mocy w żelazie wirnika, w całkowitych stratach mocy $\Delta P_{Fe}'(i_t, f_M)$. Straty mocy w przekształtniku

$$\Delta P_p(i_p, f_M) = \Delta u_p(i_p, f_M) \cdot i_p(t). \quad (7)$$

Pełny model matematyczny układu z uwzględnieniem nieliniowości jego parametrów oraz algorytm i program przedstawiono w [3].

3. Opis procedury obliczeniowej

Procedura obliczania przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych w analizowanym układzie jest następująca:

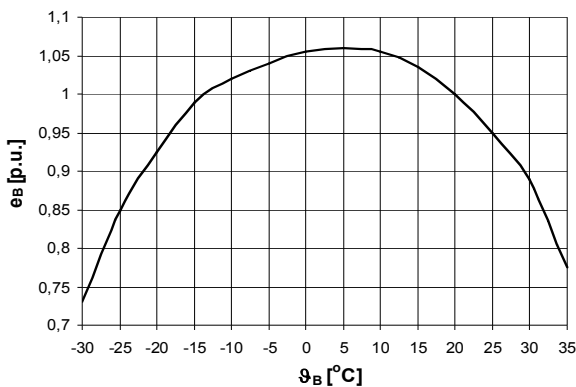
- za pomocą obliczeń połowo-obwodowych wyznaczane są:
 - zależność wartości strumienia magnetycznego od prądu twornika, kąta obrotu wirnika i temperatury magnesów,
 - pulsacje momentu elektromagnetycznego zależne od wartości prądu twornika, kąta obrotu wirnika i temperatury magnesów,
 - nasycenia w obwodzie magnetycznym silnika w zależności od wartości prądu twornika i temperatury magnesów,
- wielkości wyznaczone metodą połowo-obwodową (za pomocą komercyjnego oprogramowania) wykorzystywane są do obliczeń wartości chwilowych siły elektromotorycznej, momentu elektromagnetycznego silnika, strat mocy w żelazie oraz pozostałych wielkości,
- dla każdej chwili czasowej obliczane są m.in. wartości napięcia na akumulatorze, prądu, napięcia, momentu i prędkości silnika oraz momentu dynamicznego,
- obliczane są wartości chwilowe strat mocy w układzie. Podstawowe straty mocy w żelazie obliczane są metodą klasyczną z wykorzystaniem nasycień obliczonych połowo,
- obliczane są przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w układzie. Dochodzenie do przebiegów czasowych w stanie ustalonym odbywa się przez wykonanie obliczeń od chwili załączenia silnika,
- w procedurę obliczeń elektromagnetycznych włączone są uproszczone obliczenia cieplne, za pomocą których wyznaczane są wartości temperatury uzwojenia \mathcal{G} i temperatury magnesów \mathcal{G}_m przy zadanej temperaturze otoczenia,
- istnieje również możliwość obliczenia przebiegów czasowych w układzie oraz charak-

terystyk elektromechanicznych silnika przy różnych zadanych wartościach temperatury otoczenia, temperatury magnesów i temperatury twornika.

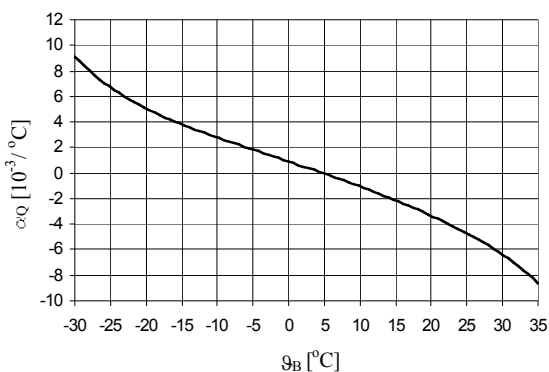
Program opracowano w środowisku Matlab-Simulink. Do obliczeń numerycznych zastosowano stało-krokową metodę Rungego-Kutty.

4. Wyniki obliczeń

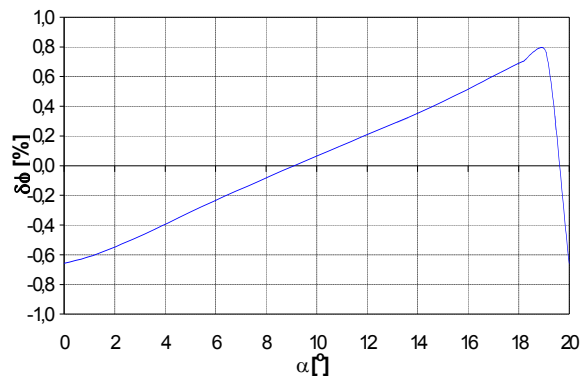
Analizę obliczeniową przeprowadzono na przykładzie układu z silnikiem o następujących parametrach: napięcie zasilania $U_{isr} \leq 160$ V, moment obciążenia $T_o \leq 1$ Nm, prędkość obrotowa $n \leq 8000$ obr/min., magnesy ferrytowe FXD 330. Dane akumulatora NiMH: pojemność znamionowa $Q_n = 3,3$ Ah, liczba ogniów $n_o = 30$, napięcie w stanie bezprądowym w temperaturze 5°C $U_B(0) = 40,2$ V. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2...11. Przebiegi przedstawione na rysunkach 4...10 dotyczą temperatury otoczenia $\vartheta = 20^\circ\text{C}$.



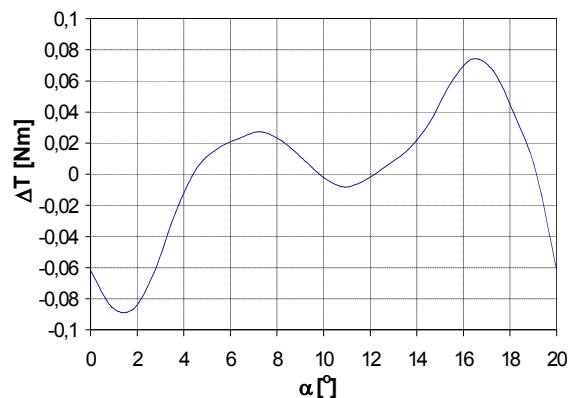
Rys. 2. Wyznaczona na podstawie [4] zależność siły elektromotorycznej akumulatora NiMH od temperatury



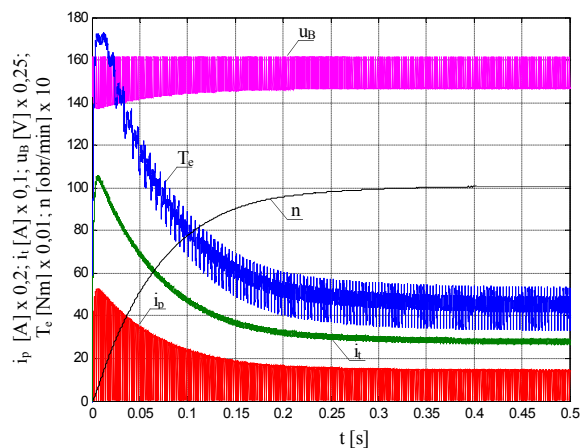
Rys. 3. Wyznaczona na podstawie [4] zależność temperaturowego współczynnika zmian pojemności akumulatora od temperatury



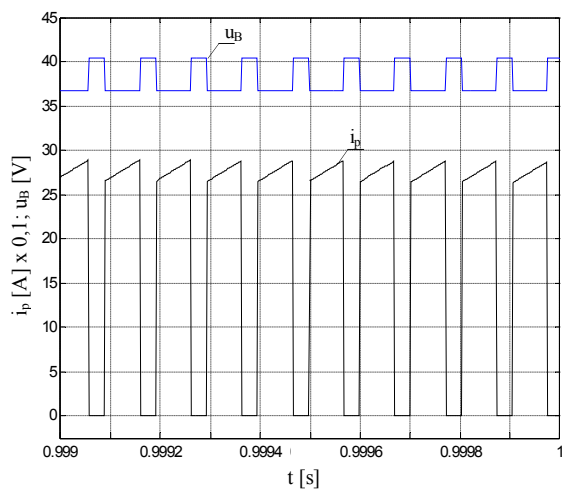
Rys. 4. Względna zmiana strumienia magnetycznego jako funkcja kąta obrotu wirnika ($T_o = 0,3$ Nm)



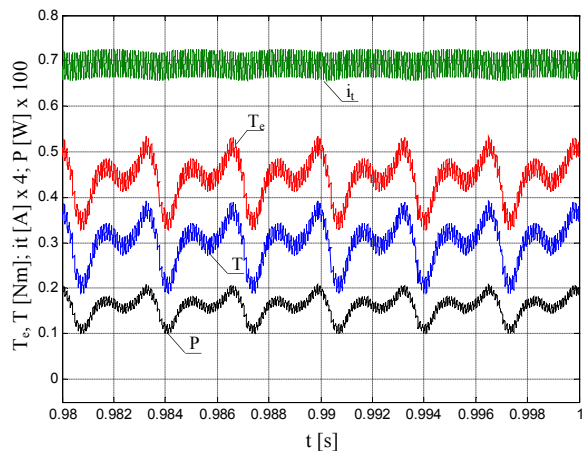
Rys. 5. Pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika jako funkcja kąta obrotu ($T_o = 0,3$ Nm)



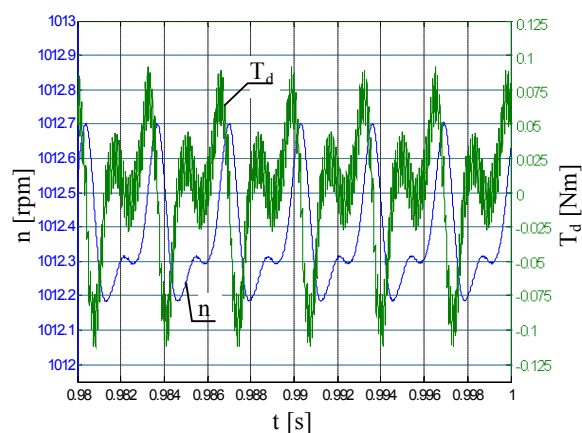
Rys. 6. Przebiegi prądu i_p pobieranego z akumulatora, prądu twornika i_b , napięcia na akumulatorze u_B , momentu elektromagnetycznego T_e oraz prędkości obrotowej n podczas rozruchu silnika; $f_M = 10$ kHz; $\gamma = 0,7$; $T_o = 0,3$ Nm



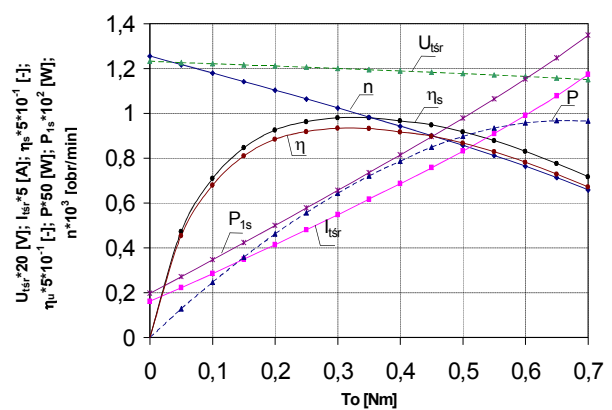
Rys. 7. Przebiegi napięcia u_B i prądu i_p pobieranego z akumulatora; $f_M = 10$ kHz; $\gamma = 0,7$; $T_o = 0,3$ Nm



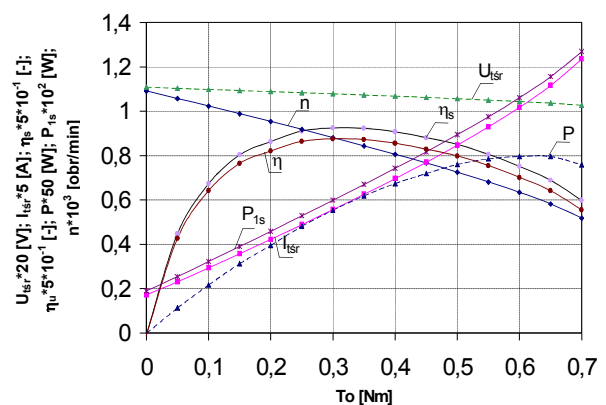
Rys. 8. Przebiegi momentu elektromagnetycznego T_e , momentu mechanicznego T , prądu twornika i_t oraz mocy mechanicznej P silnika; $f_M = 10$ kHz; $\gamma = 0,7$; $T_o = 0,3$ Nm



Rys. 9. Przebiegi momentu dynamicznego T_d oraz prędkości obrotowej silnika n ; $f_M = 10$ kHz; $\gamma = 0,7$; $T_o = 0,3$ Nm



Rys. 10. Charakterystyki elektromechaniczne silnika; $f_M = 10$ kHz; $\gamma = 0,7$; $\vartheta = 20^\circ\text{C}$; η_s – sprawność silnika, η – sprawność silnika wraz z przekształtnikiem, P_{is} – moc pobierana przez silnik, P – moc oddawana przez silnik



Rys. 11. Charakterystyki elektromechaniczne silnika; $f_M = 10$ kHz; $\gamma = 0,7$; $\vartheta = -20^\circ\text{C}$;

5. Analiza wyników

Opracowany model matematyczny, algorytm i program umożliwiają obliczanie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych oraz wyznaczanie charakterystyk elektromechanicznych silnika. Umożliwiają również analizę obliczeniową wpływu różnych czynników na pracę komutatorowego silnika o magnesach trwałych zasilanego z akumulatora przez przekształtnik impulsowy.

Istotnym czynnikiem, który należy uwzględnić przy wyznaczaniu przebiegów czasowych oraz charakterystyk elektromechanicznych w takim układzie jest temperatura otoczenia, magnesów, uzwojenia i akumulatora. Temperatura wpływa między innymi na wartość strumienia magnetycznego w silniku oraz parametry akumulatora. Siła elektromotoryczna oraz pojemność akumulatorów kwasowo-olowiowych wzrastają

wraz ze wzrostem temperatury [1]. W przypadku zastosowanego akumulatora NiMH jest inaczej. Siła elektromotoryczna oraz pojemność akumulatora mają wartość największą w temperaturze 5°C (rys. 2, 3). Zmniejszają się wraz ze zmianą temperatury.

Z wykonanej analizy obliczeniowej układu wynikają następujące wnioski szczegółowe:

- napięcie na akumulatorze zmienia się wraz ze zmianą temperatury. Zmniejszenie temperatury akumulatora z 20°C do (-20)°C (przy $T_o = 0,3 \text{ Nm}$) powoduje zmniejszenie napięcia na akumulatorze o 9,6%, zmianę napięcia na silniku o 9,8% i zmianę prędkości obrotowej o 15% (rys. 10, 11),
- w przebiegach czasowych prądu twornika i momentu (rys. 6, 8) występują pulsacje o częstotliwości pracy przekształtnika f_M oraz pulsacje o częstotliwości żłobkowej,
- pulsacje strumienia magnetycznego oraz pulsacje prądu twornika przenoszą się na przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego (rys. 6, 8) i siły elektromotorycznej,
- w wyniku pulsacji momentu elektromagnetycznego pojawia się moment dynamiczny (rys. 9) oraz pulsacje prędkości obrotowej. Pulsacje momentu dynamicznego są rzędu 66% wartości średniej momentu mechanicznego (rys. 9), a pulsacje prędkości obrotowej nie przekraczają 0,5%.

6. Podsumowanie

Opracowano model matematyczny, algorytm i program obliczeniowy układu: akumulator – przekształtnik impulsowy – silnik komutatorowy o magnesach trwałych. Uwzględniają one m.in. wpływ: temperatury, pojemności i stopnia naładowania akumulatora, częstotliwości modulacji i współczynnika wypełnienia impulsów przekształtnika oraz wartości momentu obciążenia

na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych oraz na charakterystyki ruchowe układu.

Opracowany model matematyczny, algorytm i program są przydatne do analizy obliczeniowej elektronarzędzi zasilanych z autonomicznych źródeł energii (akumulatorów) na etapie ich projektowania.

7. 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] Dudzikowski I., Gierak D., Cebulak A.: *Wyznaczanie przebiegów czasowych i charakterystyk elektromechanicznych silników o magnesach trwałych zasilanych z przekształtników impulsowych*. Przegląd Elektrotechniczny, Numer 10/2005, ss. 69-74
- [3] Dudzikowski I., Ciurys M., Gierak D.: *Permanent magnet commutator motor supplied by battery through pulse converter*, Raport serii SPR 7/2007, Wrocław 2007
- [4] Szumanowski A.: *Hybrid electric vehicle Drives Design*. Publishing and Printing House of the Institute for Sustainable Technologies, Radom 2006

Autorzy

Dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski, prof. PWR,
e-mail: ignacy.dudzikowski@pwr.wroc.pl
Mgr inż. Marek Ciurys
e-mail: marek.ciurys@pwr.wroc.pl
Politechnika Wrocławska,
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów
Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław