

Michał JANASZEK

ANALIZA WPLYWU NIEJEDNAKOWYCH PARAMETRÓW SILNIKÓW NA PRACĘ WIELOSILNIKOWEGO NAPĘDU TRAKCYJNEGO

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono analizę pracy czterosilnikowego elektrycznego napędu trakcyjnego przeznaczonego dla pojazdów terenowych. W napędzie zastosowano silniki synchroniczne o magnesach trwałych o budowie odwróconej zamontowane bezpośrednio w kołach napędowych pojazdu. W układzie sterowania zastosowano metodę bezpośredniej regulacji prądu z modulacją wektora napięcia. Podano wyniki obliczeń symulacyjnych określających wpływ niejednakowych parametrów silników synchronicznych na pracę napędu.*

Słowa kluczowe: *napęd elektryczny, silnik synchroniczny*

1. WSTĘP

Zauważalne w ostatnich latach zainteresowanie napędami elektrycznymi w zastosowaniu do pojazdów wynika z troski o ochronę środowiska naturalnego związanej z dążeniem do eliminacji zanieczyszczeń jakie emitowane są przez silniki spalinowe. Uważa się, że najważniejszymi zaletami pojazdów o napędzie elektrycznym w porównaniu do pojazdów spalinowych są:

- brak wydzielania spalin w miejscu eksploatacji pojazdu,
- wyższa sprawność energetyczna i możliwość odzysku energii hamowania,
- bezpieczny magazyn energii,
- mniejsze koszty energii i eksploatacji,
- niska emisja hałasu.

dr inż. Michał JANASZEK

e-mail: m.janaszek@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 268, 2015

Przewiduje się, że pojazdy o napędzie elektrycznym będą stosowane tam, gdzie użycie pojazdów o napędzie spalinowym jest niewskazane lub zabronione. Najczęściej wymienia się obszary chronione pod względem ekologicznym, np.: centra zabytkowych miast, wydzielone obszary o ograniczonym ruchu drogowym, parki narodowe, tereny rekreacyjne czy pola golfowe. Obecnie najczęściej spotykane pojazdy terenowe o napędzie elektrycznym (electric vehicles) są to pojazdy o masie całkowitej do 1 tony i bardzo różnym przeznaczeniu, to jest osobowe do przewozu od 2 do 6 osób, towarowe, dostawcze, maszyny robocze, ciągniki itp. Mają one napęd na dwa lub cztery koła o mocy kilku kW. Prędkość ich jazdy nie przekracza 25 km/h.

Wskazane jest jednak opracowanie pojazdów o większej masie i prędkości jazdy. Ze względów technicznych korzystne jest zatem zastosowanie kilku napędów pracujących równolegle przy ograniczeniu ich mocy do kilku kW. W związku z opracowaniem w Instytucie Elektrotechniki silników synchronicznych z magnesami trwałymi i budowie odwróconej o momencie znamionowym 180 Nm i mocy znamionowej 5,4 kW przy prędkości 30 rad/s, możliwe stało się skonstruowanie pojazdu turystycznego o masie całkowitej do 2 ton z napędem na cztery koła [1]. Zastosowanie silników wbudowanych w koła pozwala na wyeliminowanie przekładni mechanicznych i umożliwia jazdę wybiegiem. Ponadto zastosowane w napędzie silniki synchroniczne mają wyższą sprawność niż silniki indukcyjne [2].

Stosowane dotychczas strategie sterowania pojazdów przy zastosowaniu układów napędowych z silnikami synchronicznymi zakładały zastosowanie jednego lub dwóch napędów. Praca z bardzo małymi prędkościami wymaga bardzo małych częstotliwości napięcia zasilającego (poniżej 1 Hz). Uzyskanie napięcia sinusoidalnego o tak małych częstotliwościach jest trudne do uzyskania. Istotnym problemem może być równomierność momentów rozwijanych przez poszczególne napędy przy małych prędkościach i w stanach dynamicznych, to jest podczas rozruchu i hamowania pojazdu.

Zastosowanie w pojeździe wielonapędowego systemu trakcyjnego powoduje, że sterowanie napędem znacznie się komplikuje. Najprostszym takim systemem jest napęd czterosilnikowy o budowie modułowej. Pojedynczy moduł napędowy składa się z silnika wbudowanego w koło, przekształtnika tranzystorowego i autonomicznego sterownika. Liczba modułów napędowych musi być parzysta, ze względu na konieczność jednoczesnego napędzania kół po lewej i prawej stronie pojazdu. Silniki synchroniczne lub bezszczotkowe wymagają synchronizacji napięcia zasilającego względem strumienia, co wymusza konieczność zastosowania układu „jeden przekształtnik – jeden silnik”. Całością takiego systemu trakcyjnego steruje procesorowy sterownik nadrzędny. Celem pracy jest symulacyjna analiza pracy omawianego systemu trakcyjnego złożonego z czterech modułów napędowych.

Produkowane seryjnie silniki, wytwarzane według tego samego projektu i tej samej technologii, niestety różnią się parametrami. Rezystancja i indukcyjność faz, stałe napięciowe i momentowe silników mogą różnić się w granicach od kilku do kilkunastu procent. Przyczyną są niedokładności wykonania oraz parametry pracy np. różne chwilowe temperatury poszczególnych silników. W pracy pokazano, że niejednakowe wartości stałych napięciowych i momentowych silników mają decydujący wpływ na pracę całego wielosilnikowego systemu napędowego. Stałe te są zależne od wartości strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniami faz silnika, a ten od indukcji magnesów. Producent silników może nie mieć wpływu na rozrzut parametrów dostarczanych magnesów trwałych.

2. SILNIKI SYNCHRONICZNE O BUDOWIE ODWRÓCONEJ

Powszechnie stosowane silniki synchroniczne mają stojan zewnętrzny, w którym umieszczone są uzwojenia trzech faz. Wirnik o magnesach trwałych umieszczony jest wewnątrz stojana. W napędach trakcyjnych najczęściej stosowane są silniki szybkoobrotowe i napędzające koła pojazdu za pośrednictwem przekładni mechanicznej. W celu eliminacji przekładni mechanicznej oraz bezpośredniego połączenia silnika z kołem napędowym pojazdu opracowano silniki o budowie odwróconej. Uzwojony stojan mocowany jest do elementu konstrukcyjnego pojazdu, a wirnik z magnesami trwałymi połączony został bezpośrednio z kołem.

Silniki do napędu bezpośredniego można podzielić ze względu:

- na drogę strumienia: na silniki o strumieniu osiowym i silniki o strumieniu promieniowym;
- na prędkość obrotową: na silniki wolnoobrotowe (prędkość mniejsza niż 350 obr/min) i silniki szybkoobrotowe (prędkość większa niż 1000 obr/min).

Do napędzania pojazdów opracowano silniki typu ETMm-180/12 o strumieniu promieniowym [1, 2]. Moment znamionowy określono na 180 Nm z możliwością krótkotrwałego przeciążenia do 320 Nm. Są to silniki wolnoobrotowe o prędkości do 350 obr/min przy zasilaniu przekształtnika napięciem ok. 150 V (rys. 1).

Stałe silnika określono jak następuje: $k_e = 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$ i $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$.

Silniki wyposażone są w czujniki optoelektroniczne odbiciowe określające położenie wirnika względem stojana i pozwalające synchronizować napięcie zasilające fazy silnika z położeniem wirnika.

a)



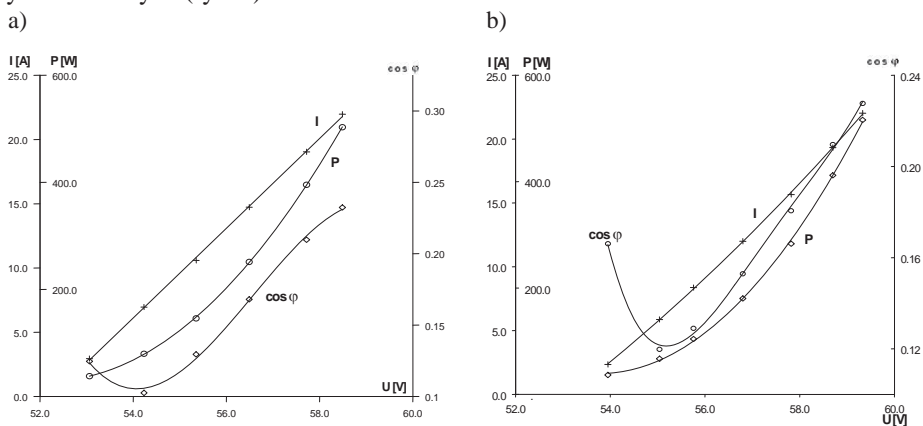
b)



Rys. 1. Kompletny silnik synchroniczny o budowie odwróconej:

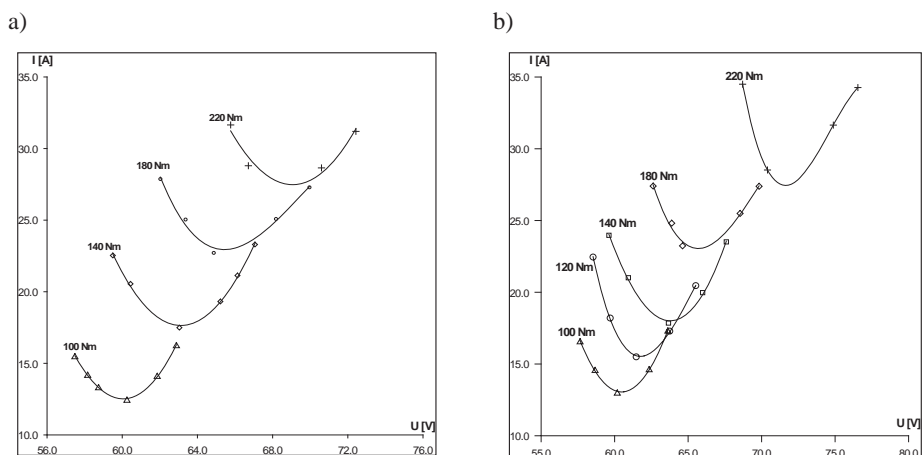
a) widok od strony mocowania koła pojazdu, b) widok od strony mocowania do podwozia pojazdu

Rzeczywiste parametry techniczne dwóch egzemplarzy tego samego modelu silnika określone zostały w badaniach laboratoryjnych [3]. Wyniki pokazują, że różne egzemplarze tego samego modelu silnika, wykonane w tej samej technologii mają zwykle niejednakowe parametry, co ma wpływ na pracę napędu wielosilnikowego. Próby biegu jałowego wykonano dla silnika nr 1 i nr 2 przy prędkości obrotowej: 107 obr/min. Zmieniając napięcie zasilające od 54 V do 60 V mierzono wartość skuteczną prądu, moc czynną i współczynnik mocy (rys. 2). Krzywe „V” wyznaczono przy dwóch prędkościach obrotowych 107 obr/min i 214 obr/min oraz kilku obciążeniach: 100 Nm, 120 Nm, 140 Nm, 180 Nm i 220 Nm. Przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym badane silniki są silnikami synchronicznymi. Wykonano pomiary prądów w funkcji napięcia zasilającego przy stałym momencie na wale silnika. Odpowiada to tzw. krzywym „V” silników synchronicznych (rys. 3).



Rys. 2. Charakterystyki biegu jałowego silników przy prędkości $n = 107$ obr/min:

a) silnik nr 1, b) silnik nr 2



Rys. 3. Przebiegi krzywych „V” przy różnych momentach obciążenia i prędkości obrotowej $n = 107$ obr/min. Czężotliwość napięcia $f = 10,7$ Hz: a) silnik nr 1, b) silnik nr 2

3. PARAMETRY SYSTEMU NAPĘDOWEGO

Do dalszej analizy obliczeniowej przyjęto następujące założenia dotyczące pojazdu terenowego przeznaczonego do przewozu osób. Pojazd taki wykorzystywany byłby do przewozu turystów po obszarach Parków Narodowych:

Całkowita masa pojazdu:	$M_{\text{POJ}} = 2 \text{ t}$
Prędkość znamionowa pojazdu:	$V_{\text{nom}} = 7,5 \text{ m/s}$ ($v_{\text{nom}} = 27 \text{ km/h}$)
Prędkość maksymalna pojazdu:	$V_{\text{max}} = 10 \text{ m/s}$ ($v_{\text{max}} = 36 \text{ km/h}$)
Przyspieszenie maksymalne pojazdu:	$a = 2 \text{ m/s}^2$
Maksymalne nachylenie drogi:	$\alpha = 20\%$

Powyższe parametry pojazdu determinują parametry jakie powinien mieć jego system napędowy.

System napędowy pojazdu pracuje w dwóch obszarach sterowania:

- Obszarze pracy z ograniczeniem siły ciągu do wartości maksymalnej.
- Obszarze pracy z ograniczeniem mocy mechanicznej do wartości maksymalnej.

System napędowy pracuje w czterech ćwiartkach płaszczyzny „prędkość – siła ciągu”, przy czym przyjmujemy następujące określenia (rys. 4):

- Określamy prędkość jazdy do przodu jako prędkość dodatnią, do tyłu jako ujemną.
- Siłę ciągu do przodu określamy jako dodatnią a do tyłu jako ujemną.
- Przyspieszenie podczas rozruchu przy jeździe do przodu jest dodatnie, przy jeździe do tyłu ujemne.
- Spowolnienie podczas hamowania przy jeździe do przodu jest ujemne, przy jeździe do tyłu dodatnie.

Dla przypadku pracy silnikowej systemu napędowego:

Obszar 1 to zakres prędkości: $-V_{\text{nom}} < V < V_{\text{nom}}$, gdzie napęd pracuje przy ograniczeniu siły ciągu do wartości maksymalnej:

Dla jazdy do przodu:

$$F_{\text{max}} = a \cdot M_{\text{POJ}} = 2 \cdot 2 = 4 \text{ kN} \quad (1)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$F_{\text{max}} = a \cdot M_{\text{POJ}} = -2 \cdot 2 = -4 \text{ kN} \quad (2)$$

Moc mechaniczna napędu jest w tym zakresie liniowo zależna od prędkości. Wartość maksymalną mocy mechanicznej napęd osiąga przy prędkości znamionowej.

Dla jazdy do przodu:

$$P_{\text{max}} = V_{\text{nom}} \cdot F_{\text{max}} = 7,5 \cdot 4 = 30 \text{ kW} \quad (3)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$P_{\max} = V_{\text{nom}} \cdot F_{\max} = (-7,5) \cdot (-4) = 30 \text{ kW} \quad (4)$$

Obszar 2 to zakresy prędkości $-V_{\max} < V < -V_{\text{nom}}$ oraz $V_{\text{nom}} < V < V_{\max}$, gdzie napęd pracuje z ograniczeniem mocy do wartości maksymalnej P_{\max} .

Siła ciągu jest w tym zakresie odwrotnie proporcjonalna do prędkości, czyli maleje przy wzroście prędkości. Przy osiągnięciu prędkości maksymalnej siła ciągu wynosi:

Dla jazdy do przodu:

$$F_{V_{\max}} = \frac{P_{\max}}{V_{\max}} = \frac{30}{10} = 3 \text{ kN} \quad (5)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$F_{V_{\max}} = \frac{P_{\max}}{-V_{\max}} = \frac{30}{-10} = -3 \text{ kN} \quad (6)$$

Dla przypadku pracy prądnicowej systemu napędowego (hamowania generatorowego):

Obszar 1 w zakresie prędkości: $-V_{\text{nom}} < V < V_{\text{nom}}$ napęd pracuje przy ograniczeniu siły hamowania do wartości maksymalnej:

Dla jazdy do przodu:

$$F_{\max} = a \cdot M_{\text{POJ}} = -2 \cdot 2 = -4 \text{ kN} \quad (7)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$F_{\max} = a \cdot M_{\text{POJ}} = 2 \cdot 2 = 4 \text{ kN} \quad (8)$$

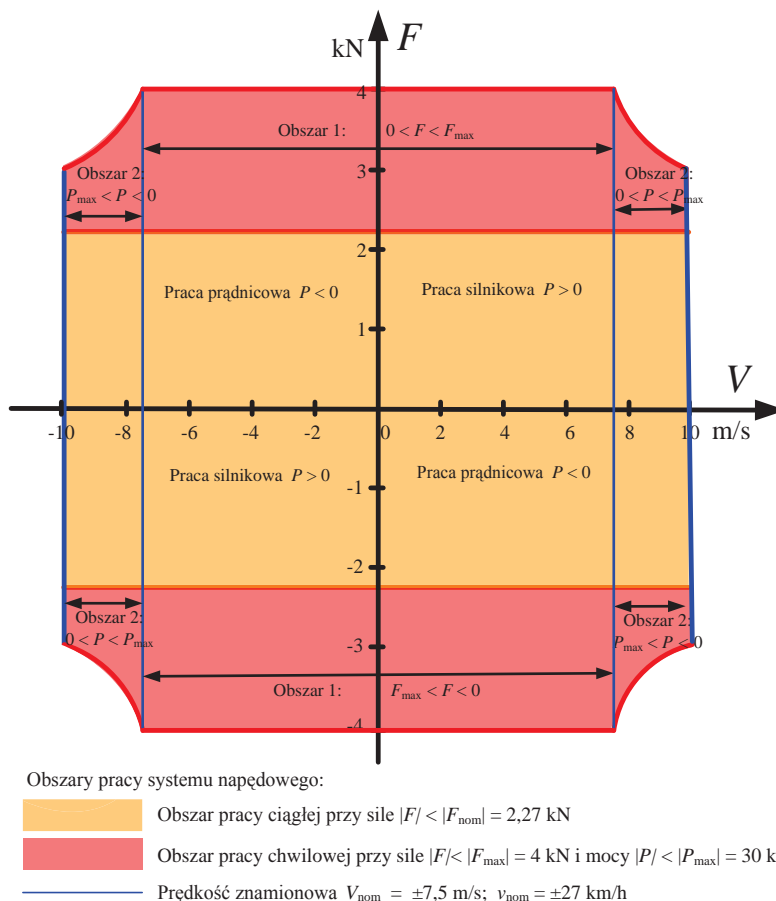
Moc mechaniczna napędu jest w tym zakresie liniowo zależna od prędkości. Wartość maksymalną mocy mechanicznej napęd osiąga przy prędkości znamionowej.

Dla jazdy do przodu:

$$P_{\max} = V_{\text{nom}} \cdot F_{\max} = 7,5 \cdot (-4) = -30 \text{ kW} \quad (9)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$P_{\max} = V_{\text{nom}} \cdot F_{\max} = -7,5 \cdot 4 = -30 \text{ kW} \quad (10)$$



Rys. 4. Obszary pracy systemu napędowego we współrzędnych prędkość – siła

Obszar 2 to zakresy prędkości $-V_{max} < V < -V_{nom}$ oraz $V_{nom} < V < V_{max}$ gdzie napęd pracuje z ograniczeniem mocy do wartości maksymalnej P_{max} .

Siła hamowania jest w tym zakresie odwrotnie proporcjonalna do prędkości, czyli rośnie przy spadku prędkości. Dla prędkości maksymalnej siła hamowania wynosi:

Dla jazdy do przodu:

$$F_{V_{max}} = \frac{P_{max}}{V_{max}} = \frac{-30}{10} = -3 \text{ kN} \quad (11)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$F_{V_{max}} = \frac{-P_{max}}{-V_{max}} = \frac{-30}{-10} = 3 \text{ kN} \quad (12)$$

Ponadto określono wartość znamionową siły ciągu zależną od znamionowych wartości momentów silników $T_{Knom} = 180 \text{ Nm}$:

Dla jazdy do przodu:

$$F_{nom} = \frac{4 \cdot T_{Knom}}{R_0} = \frac{4 \cdot 180}{0,317} = 2,27 \text{ kN} \quad (13)$$

Dla jazdy do tyłu:

$$F_{nom} = -\frac{4 \cdot T_{Knom}}{R_0} = -\frac{4 \cdot 180}{0,317} = -2,27 \text{ kN} \quad (14)$$

4. TOPOLOGIA SYSTEMU NAPĘDOWEGO

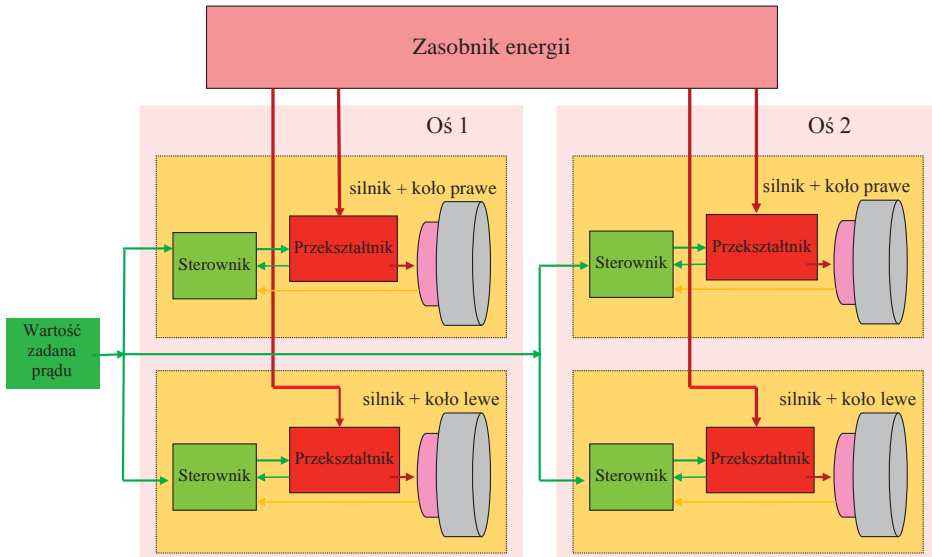
Topologię systemu napędowego oparto na koncepcji, że składa się on z 4 modułów napędowych bezpośrednich o następującej konfiguracji (rys. 5):

- Zastosowano bezpośrednie połączenie silnika z kołem napędowym, czyli bez przekładni mechanicznej
- Silnik jest wbudowany w koło napędowe pojazdu. Jest to silnik synchroniczny o magnesach trwałych i o budowie odwróconej, momentowy, wolnoobrotowy.
- Moduły napędowe napędzają prawe i lewe koła pojazdu obracające się w przeciwnych kierunkach, odpowiednio prawym i lewym. Para modułów stanowi oś napędową. Rozpatrywany system napędowy składa się z dwóch osi napędowych.
- Układ energoelektroniczny modułu napędowego zawiera przekształtnik tranzystorowy i autonomiczny sterownik numeryczny.
- System napędowy zasilany będzie z akumulatorowego zasobnika energii.
- Pojazd sterowany będzie poprzez sterownik nadrzędny.

Kierowanie pojazdem polega na ustalaniu przez kierowcę następujących wielkości:

- Kierunku ruchu pojazdu, do przodu lub do tyłu.
- Prędkości z jaką powinien jechać pojazd.
- Chwilowego przyspieszenia lub spowolnienia pojazdu.
- Odległości, którą ma przejechać pojazd.

Podczas jazdy kierowca ocenia aktualną prędkość, przyspieszenie lub spowolnienie pojazdu i we właściwy sposób reaguje zwiększając lub zmniejszając wartość zadaną momentu napędowego. Kierowca jest więc „regulatorem prędkości pojazdu”. Układ napędowy pojazdu stanowi dla kierowcy element wykonawczy, który reguluje moment napędowy lub wielkość proporcjonalną do momentu, np. prąd.



Rys. 5. Schemat systemu napędowego o budowie modułowej z podziałem na dwie osie napędowe z czterema napędami bezpośrednimi z silnikami synchronicznymi o magnesach trwałych i budowie odwróconej wbudowanymi w koła

Wybrana topologia pojedynczego modułu napędowego zawiera:

- Koło napędowe dla którego przyjęto oponę 195/65 R15 o średnicy zewnętrznej $d = 0,195 \text{ m} \cdot 2 \cdot 65\% + 0,381 \text{ m} (15 \text{ cali}) = 0,635 \text{ m}$.

Wymiary koła napędowego:

Średnica $d = 0,635 \text{ m}$, promień $R_0 = 0,317 \text{ m}$, obwód $l = 2 \text{ m}$.

- Silnik synchroniczny o magnesach trwałych i o budowie odwróconej, wbudowany w koło napędowe pojazdu. Silnik wyposażony jest w czujniki optoelektroniczne odbiciowe określające położenie wirnika względem stojana i pozwalające synchronizować napięcie zasilające fazy silnika względem wirnika. Ponieważ magnesy połączone są trwale z wirnikiem to synchronizacja względem wirnika jest jednocześnie synchronizacją względem strumienia silnika.

Stała napięciowa silnika wynosi: $k_e = 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$

Stała momentowa silnika wynosi: $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$

Moment znamionowy silnika $T_{Knom} = 180 \text{ Nm}$.

- Przekształtnik tranzystorowy trójfazowy, zasilający silnik w układzie „jeden przekształtnik – jeden silnik”.
- Sterownik procesorowy z procesorem TMS320F2812 produkcji Texas Instruments.
- Moduł napędowy zasilany jest z akumulatorowego zasobnika energii złożonego z 12 akumulatorów o napięciu znamionowym 12 V. Wartość znamionowa napięcia zasilającego wynosi 144 V, a zakres zmian napięcia od 132 V do 156 V.

5. PARAMETRY MODUŁU NAPĘDOWEGO

Przy maksymalnej prędkości pojazdu $V_{\max} = 10 \text{ m/s}$ ($v_{\max} = 36 \text{ km/h}$) maksymalna prędkość obrotowa koła napędowego wynosi:

$$n_{K\max} = \frac{60 \cdot V_{\max}}{1} = \frac{60 \cdot 10}{2} = 300 \text{ obr/min}; \quad (15)$$

a maksymalna prędkość kątowna koła napędowego równa jest:

$$\omega_{K\max} = \frac{2\pi \cdot n_{K\max}}{60} = \frac{2\pi \cdot 300}{60} = 31,4 \text{ rad/s} \quad (16)$$

Przy znamionowej prędkości pojazdu $V_{\text{nom}} = 7,5 \text{ m/s}$ ($v_{\text{nom}} = 27 \text{ km/h}$) znamionowa prędkość obrotowa koła napędowego wynosi:

$$n_{K\text{nom}} = \frac{60 \cdot V_{\text{nom}}}{1} = \frac{60 \cdot 7,5}{2} = 225 \text{ obr/min}; \quad (17)$$

znamionowa prędkość kątowna koła napędowego równa jest:

$$\omega_{K\text{nom}} = \frac{2\pi \cdot n_{K\text{nom}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 225}{60} = 23,6 \text{ rad/s} \quad (18)$$

Maksymalna siła ciągu modułu napędowego wynosi:

$$F_{K\max} = \frac{1}{4} \cdot F_{\max} = 0,25 \cdot 4 = 1 \text{ kN} \quad (19)$$

Maksymalny moment modułu napędowego równa się:

$$T_{K\max} = F_{K\max} \cdot R_0 = 1000 \cdot 0,317 = 317 \text{ Nm} \quad (20)$$

Maksymalna siła ciągu modułu napędowego przy prędkości maksymalnej:

$$F_{KV\max} = \frac{1}{4} \cdot F_{V\max} = 0,25 \cdot 3 = 750 \text{ kN} \quad (21)$$

Maksymalny moment modułu napędowego przy prędkości maksymalnej:

$$T_{KV\max} = F_{KV\max} \cdot R_0 = 750 \cdot 0,317 = 240 \text{ Nm} \quad (22)$$

Maksymalna moc mechaniczna na wale koła napędowego wynosi:

$$P_{Kmax} = \omega_{Knom} \cdot T_{Kmax} = 23,6 \cdot 317 = 7,5 \text{ kW} \quad (23)$$

Co stanowi jedną czwartą maksymalnej mocy mechanicznej systemu napędowego:

$$P_{Kmax} = 0,25 \cdot P_{max} = 0,25 \cdot 30 = 7,5 \text{ kW} \quad (24)$$

Wartości znamionowe parametrów modułu napędowego zależne są od znamionowych wartości parametrów silnika. I tak:

Znamionowy moment modułu napędowego równa się:

$$T_{Knom} = 180 \text{ Nm} \quad (25)$$

Co odpowiada znamionowej sile ciągu modułu napędowego:

$$F_{Knom} = \frac{T_{Knom}}{R_0} = \frac{180}{0,317} = 570 \text{ N} \quad (26)$$

Znamionowa moc mechaniczna modułu napędowego wynosi:

$$P_{Knom} = \omega_{Kmax} \cdot T_{Knom} = 31,4 \cdot 180 = 5,65 \text{ kW} \quad (27)$$

Oszacowanie momentu bezwładności pojazdu sprowadzonego do wału silnika

Moment bezwładności pojazdu sprowadzony do wałów silników można oszacować z zależności opisujących energię kinetyczną poruszającego się pojazdu przy jeździe z ustaloną prędkością.

Energię w zależności od prędkości liniowej zapisujemy w postaci:

$$E_{Kpoj} = \frac{1}{2} M_{POJ} \cdot V^2 \quad (28)$$

a od prędkości kątowej w postaci:

$$E_{Kpoj} = \frac{1}{2} J_{POJ} \cdot \omega^2 \quad (29)$$

Z porównania tych dwóch równań możliwe jest wyznaczenie zależności opisującej moment bezwładności pojazdu sprowadzony do wału silnika:

$$E_{Kpoj} = \frac{1}{2} \cdot M_{POJ} \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot J_{POJ} \cdot \omega^2 \quad (30)$$

$$J_{POJ} = M_{POJ} \cdot \frac{V^2}{\omega^2} \quad (31)$$

Ponieważ:

$$\omega = \frac{V}{R_O} \quad (32)$$

to

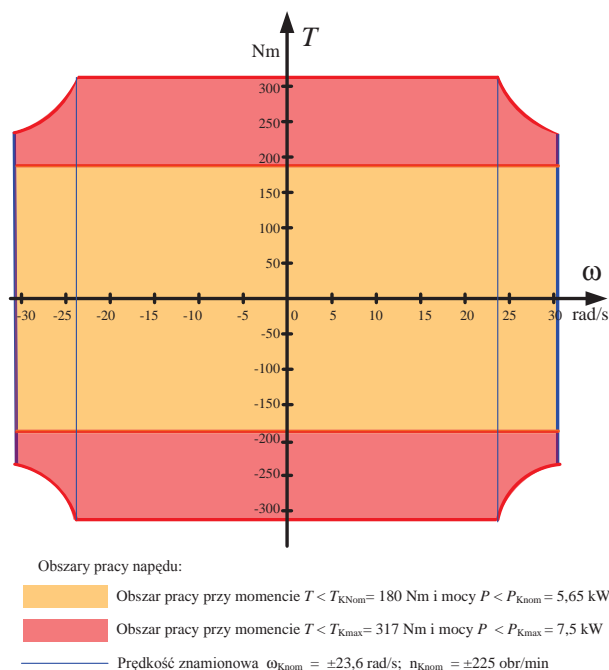
$$J_{POJ} = M_{POJ} \cdot R_O^2 \quad (33)$$

Stąd wartość liczbową oszacowanego momentu bezwładności pojazdu:

$$J_{POJ} = M_{POJ} \cdot R_O^2 = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,317^2 = 200 \text{ kgm}^2 \quad (34)$$

Moment bezwładności przypadający na jeden moduł napędowy:

$$J_K = \frac{J_{POJ}}{4} = \frac{200}{4} = 50 \text{ kgm}^2 \quad (35)$$



Rys. 6. Obszary pracy modułu napędowego we współrzędnych prędkość – moment

Przekształtnik tranzystorowy zasilany jest z zasobnika energii złożonego z 12 akumulatorów o napięciu znamionowym 12 V. Wartość znamionowa napięcia zasilającego wynosi 144 V. Dla określonych stałych silnika parametry przekształtnika wynoszą:

Znamionowa wartość prądu:

$$I_{Knom} = \frac{T_{Knom}}{k_m} = \frac{180}{4} = 45 \text{ A} \quad (36)$$

Maksymalna wartość prądu:

$$I_{Kmax} = \frac{T_{Kmax}}{k_m} = \frac{317}{4} = 80 \text{ A} \quad (37)$$

Maksymalna wartość prądu przy prędkości maksymalnej:

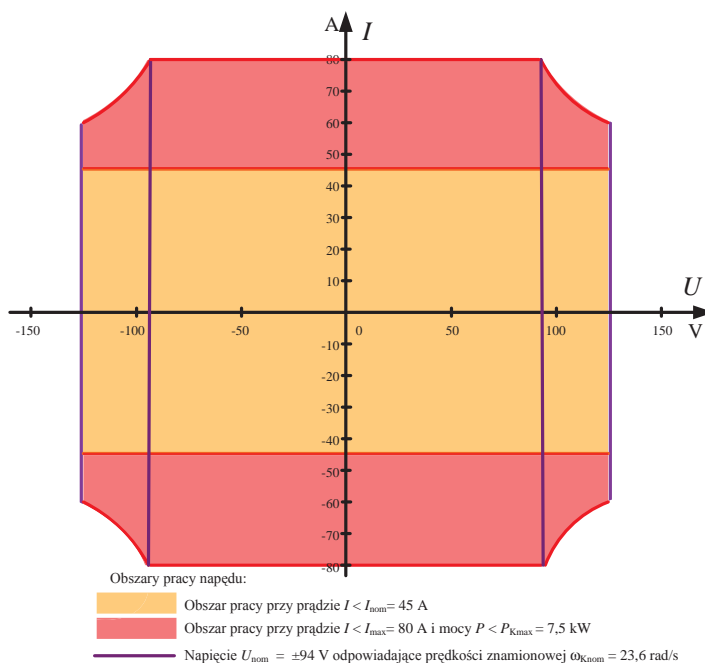
$$I_{KVmax} = \frac{T_{KVmax}}{k_m} = \frac{240}{4} = 60 \text{ A} \quad (38)$$

Prędkość maksymalna osiągnięta jest przez silnik przy zasilaniu napięciem:

$$U_{max} = k_e \cdot \omega_{Kmax} = 4 \cdot 31,4 = 126 \text{ V} \quad (39)$$

Prędkości znamionowa osiągnięta jest przy napięciu:

$$U_{nom} = k_e \cdot \omega_{Knom} = 4 \cdot 23,5 = 94 \text{ V} \quad (40)$$



Rys. 7. Obszary pracy przekształtnika we współrzędnych napięcie – prąd

6. STRATEGIA STEROWANIA SYSTEMU NAPĘDOWEGO

Przy opracowywaniu koncepcji sterowania pojedynczego modułu napędowego dla pojazdu uwzględniono następujące uwarunkowania [4]:

- Napędzany pojazd ma dużą masę, co oznacza duży moment bezwładności sprowadzony do wału silnika napędzającego. Zmiana liczby przewożonych osób lub zmiana przewożonego towaru powoduje, że masa ta zmienia się w dużym zakresie, co utrudnia regulację napędu w pętli sprzężenia prędkościowego.
- Konieczna jest możliwość osiągania różnych prędkości kół lewych i prawych przy zadanych jednakowych prądach podczas jazdy po łuku, czyli realizacja mechanizmu różnicowego. Nie pozwala to na zastosowanie sprzężenia prędkościowego.
- Konieczne jest zmienianie momentu napędowego niezależnie od prędkości pojazdu.
- Wskazana jest możliwość jazdy wybiegiem co wyklucza zastosowanie przekładni mechanicznej, szczególnie samohamownej.

Dalej założono, że układ regulacji modułu napędowego powinien zapewniać:

- pracę w czterech ćwiartkach układu współrzędnych moment – prędkość (rys. 6),
- pracę przerywaną w funkcji czasu,
- hamowanie generatorowe,
- niski poziom hałasu co określa częstotliwość impulsów PWM co najmniej 10 kHz.

Przyjęto, że na przebieg typowego cyklu pracy składa się z następujących etapów:

- Rozruch do prędkości ustalonej z zadanim momentem.
- Jazda wybiegiem. Praca bez momentu ze zmniejszającą się prędkością.
- Nawrót. Początkowy okres to hamowanie generatorowe (moc ujemna) końcowy okres to rozruch do ustalonej prędkości (praca silnikowa, moc dodatnia)
- Jazda ze stałą prędkością. Praca silnikowa z niewielkim momentem.
- Hamowanie generatorowe od prędkości ustalonej z zadanim momentem hamującym.

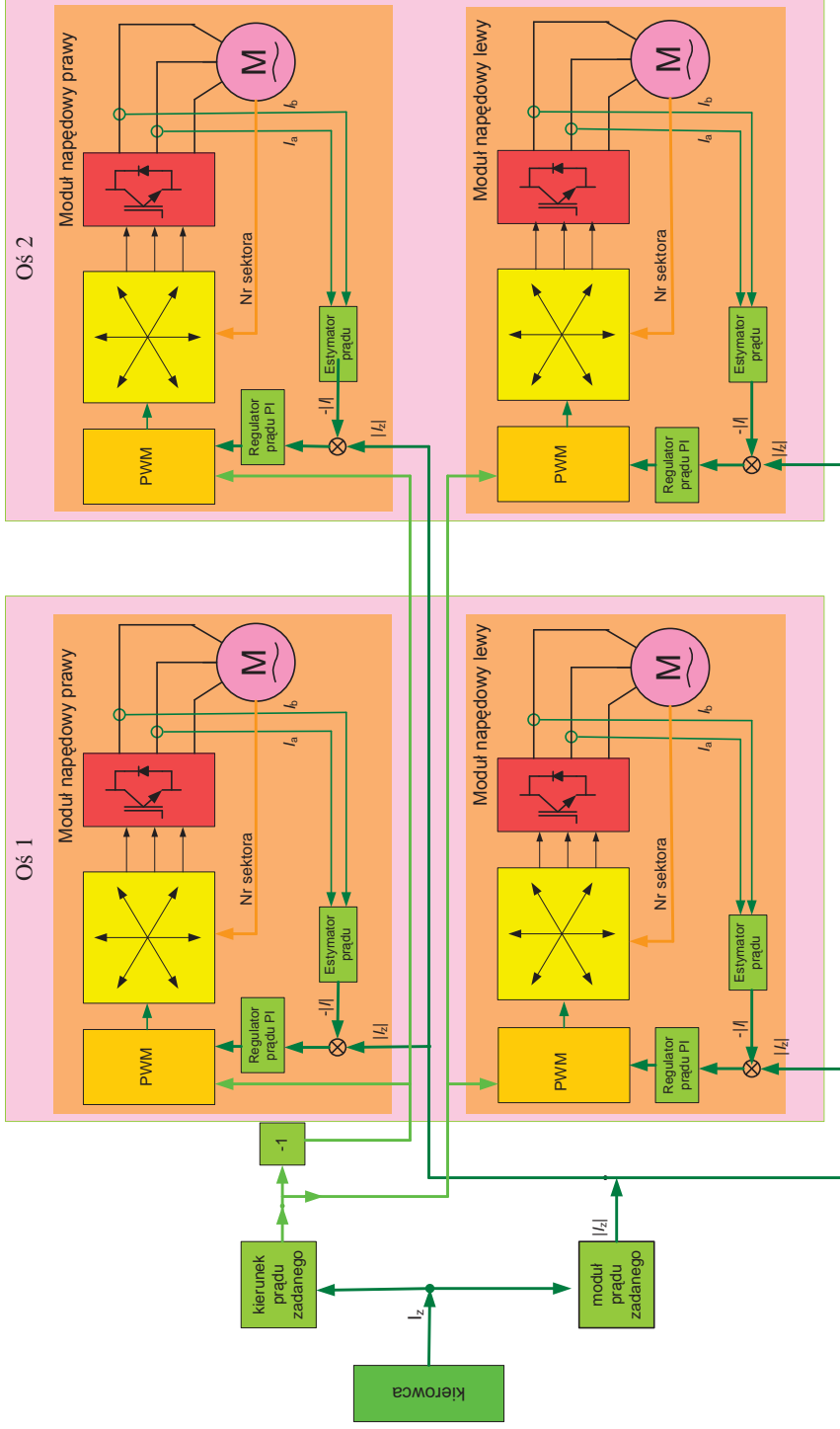
Do sterowania napędu wybrano metodę bezpośredniej regulacji prądu z modulacją wektora napięcia (DCC-SVM: ang. Direct Current Control with Space Vector Modulation). Zastosowanie bezpośredniej regulacji prądu a nie momentu pozwoliło na zrezygnowanie z estymacji strumienia co znacznie uprościło program regulacyjny i przyspieszyło jego wykonywanie. Zastosowanie czujników położenia wału silnika pozwala synchronizować prąd względem wirnika, co powoduje, że moment rozwijany przez silnik jest wprost proporcjonalny do prądu.

Układ regulacji składa się z dwóch pętli:

- Pętli bezpośredniej regulacji amplitudy prądu.
- Pętli synchronizacji względem położenia wirnika.

Wartość zadaną prądu I_z dzieli się na dwa sygnały zadające:

- Moduł wartości zadanej prądu $|I_z|$
- Kierunek prądu zadanego $+1$ lub -1



Rys. 8. Schemat układu regulacyjnego czterosilnikowego systemu napędowego

Przyjęta strategia sterowania zakłada, że w poszczególnych sektorach prąd przepływać będzie przez dwie fazy silnika podczas gdy trzecia faza zostanie wyłączona. Kolejności załączanych faz określa położenie wirnika, co jest tożsame z położeniem wektora strumienia. Fazy załączane są tak, aby wektor prądu był prostopadły do wektora strumienia tak przy pracy silnikowej jak i prądnicowej. Przy jeździe z prędkością mniejszą od maksymalnej wartość prądu ograniczana jest przez modulację PWM wektora napięcia (rys. 8).

7. SYMULACJA PRACY SYSTEMU NAPĘDOWEGO

Celem obliczeń symulacyjnych było określenie wpływu niejednakowych parametrów silników zastosowanych w poszczególnych modułach napędowych na pracę całego systemu napędowego. Parametrami silnika, które mają najważniejszy wpływ na pracę napędu są stałe: napięciowa k_e i momentowa k_m . Obliczenia symulacyjne pracy czterech modułów napędowych pracujących równolegle wykonano przy przyjętych różnych wartościach stałych silników.

Przyjęto wartości liczbowe parametrów:

Napięcie zasilające $U_{DC} = 144$ V

Wartość zadana prądu silnika $I_Z = 80$ A (rys.10, 11); $I_Z = 60$ A (rys. 12, 13, 14).

Przyjęto parametry obciążenia opisane zależnością:

$$T = T_0 + k_1 \cdot \omega + k_2 \cdot \omega^2 + \alpha \cdot J_{MN} \quad (41)$$

gdzie:

prędkość kątowna – ω rad/s ;

przyspieszenie kątowne – α rad/s² ;

stały moment obciążenia – $T_0 = 20$ Nm ;

współczynniki – $k_1 = 0,1 \frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}}$; $k_2 = 0,001 \frac{\text{Nm}}{(\text{rad/s})^2}$;

moment bezwładności sprowadzony do wału silnika – $J_K = 50$ kgm² ;

częstotliwość impulsów PWM ustalono na $f_{imp} = 10$ kHz.

Przyjęto, że stałe napięciowe i momentowe silników, których wartości znamionowe wynoszą $k_e = 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$ i $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$ mogą zmieniać się od wartości znamionowej w granicach $\pm 10\%$. Różne wartości stałych powodują, że przy tych samych wartościach zadanych prądów, moduły napędowe rozwijają różne momenty napędowe. Przy tych samych napięciach zasilających przekształtniki, moduły napędowe osiągają różne prędkości maksymalne (rys. 9).

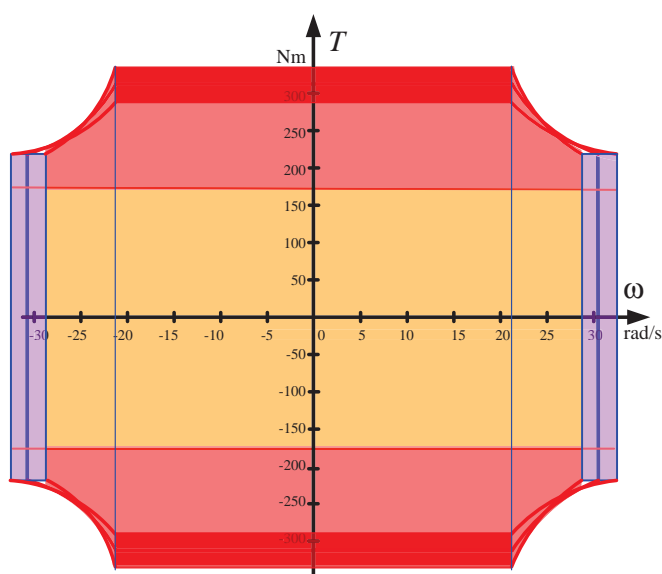
Tak więc do obliczeń przyjęto następujące wartości stałych:

$$\begin{array}{lll} k_e = 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \pm 10\% & \Rightarrow & k_e = 3,6 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \quad k_e = 4,4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \\ k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \pm 10\% & \Rightarrow & k_m = 3,6 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \quad k_m = 4,4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \\ k_e = 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \pm 5\% & \Rightarrow & k_e = 3,8 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \quad k_e = 4,2 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 k_m &= 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \pm 5\% & \Rightarrow & & k_m &= 3,8 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} & & k_m &= 4,2 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \\
 k_e &= 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \pm 2,5\% & \Rightarrow & & k_e &= 3,9 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} & & k_e &= 4,1 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}} \\
 k_m &= 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \pm 2,5\% & \Rightarrow & & k_m &= 3,9 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} & & k_m &= 4,1 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}
 \end{aligned}$$

Symulowano i pokazano na rysunkach przebiegi czasowe:

- momentów napędowych
- prędkości obrotowych kół napędowych
- mocy mechanicznych na wale silnika
- estymowanych prądów silników



Obszary pracy napędu:

- Obszar pracy przy momencie $T < T_{Knom} = 180$ [Nm] i mocy $P < P_{Knom} = 5,65$ kW
- Obszar pracy przy momencie $T < T_{Kmax} = 317$ [Nm] i mocy $P < P_{Kmax} = 7,5$ kW
- Prędkość znamionowa $\omega_{nom} = \pm 23,6$ rad/s; $V_{nom} = \pm 7,5$ m/s; $v_{nom} = \pm 27$ km/h
- Prędkość maksymalna $\omega_{max} = \pm 31,4$ rad/s; $V_{max} = \pm 10$ m/s; $v_{max} = \pm 36$ km/h
- Moment znamionowy $T_{Knom} = \pm 180$ Nm
- Moment maksymalny $T_{Kmax} = \pm 317$ Nm
- Zakres zmian prędkości $\omega_{max} \pm 10\% = \pm 31,4 \pm 10\%$ rad/s
- Zakres zmian momentu $T_{Kmax} \pm 10\% = \pm 317 \pm 10\%$ Nm

Rys. 9. Obszary pracy modułu napędowego we współrzędnych prędkość – moment przy zakresie zmian stałych silnika $\pm 10\%$ wartości znamionowej

W obliczeniach symulacyjnych przeanalizowano dwa przypadki pracy systemu napędowego: jazda na wprost i jazda po łuku.

Jazda na wprost

Czterosilnikowy system napędowy pracuje jako całość napędzając pojazd. Ponieważ silniki połączone są sztywno z drogą, to przy jeździe na wprost ich prędkości obrotowe są sobie równe. Wypadkowy moment napędzający jest sumą poszczególnych momentów rozwijanych przez moduły napędowe. Podczas jazdy na wprost można wyróżnić dwa przypadki (rys. 10):

- Praca modułów napędowych w zamkniętych pętlach regulacji prądu występująca przy jeździe z prędkością mniejszą od maksymalnej. Ponieważ siły elektromotoryczne silników są mniejsze od napięć zasilających to pętle regulacyjne prądów są zamknięte, a regulatory PWM obniżają wartości napięć fazowych do wartości odpowiadających aktualnej prędkości. Wartości prądów zasilających silniki są równe wartości zadanych prądów, a momenty rozwijane przez silniki proporcjonalne do prądów, zależne są od wartości stałych momentowych silników. Przy stałych wartościach zadanych prądów momenty rozwijane przez moduły napędowe są proporcjonalne do różnych wartości stałych silników. Podobnie moce rozwijane przez poszczególne moduły napędowe są proporcjonalne do stałych silników (rys. 12).
- Praca modułów napędowych w otwartych pętlach regulacji prądu występująca przy jeździe z prędkością bliską maksymalnej. Ponieważ wartość siły elektromotorycznej silnika jest duża, bliska wartości napięcia zasilającego, wartości rzeczywistych prądów płynących w fazach silników są mniejsze niż wartości zadane prądów. Pętle regulacyjne prądów są przerwane a modulatory PWM nie pracują. Prędkość kątowna silników ograniczana jest wartością napięcia zasilającego.
- Przy jednakowej prędkości kątowej wszystkich silników indukowane w fazach siły elektromotoryczne są różne, proporcjonalne do różnych wartości stałych napięciowych. Powoduje to, że prądy wymuszane w fazach silników różnią się znacznie od siebie, a tym samym i momenty rozwijane przez silniki znacznie różnią się od siebie (rys. 10). Wypadkowy moment rozwijany przez cały system napędowy odpowiada wartości momentu ustalonego przez opory ruchu.
- Silniki o większych stałych, które przy pracy z zamkniętą pętlą regulacji prądu rozwijały większe wartości momentu napędowego, przy pracy w układzie otwartym rozwijają mniejsze wartości momentów. Natomiast silniki o mniejszych stałych, które przy pracy z zamkniętą pętlą regulacji prądu rozwijały mniejsze wartości momentu napędowego, przy pracy w układzie otwartym rozwijają większe wartości momentów.
- W skrajnych przypadkach silniki o większych wartościach stałych mogą pracować generatorowo powodując hamowanie pojazdu, podczas gdy silniki o mniejszych stałych pracują silnikowo. Takie zjawisko powoduje niepotrzebną stratę energii elektrycznej przepływającej między modułami napędowymi i znacznie zmniejsza sprawność całego systemu napędowego.
- Kierowca kierujący pojazdem o napędzie wielosilnikowym powinien mieć świadomość, że jazda z prędkością bliską maksymalnej może mieć niekorzystny wpływ na pracę układu napędowego.

Jazda po łuku - zakręcanie w prawo lub w lewo

W przypadku jazdy po zakręcie koło zewnętrzne toczy się szybciej, wewnętrzne wolniej a działające pętle regulacji prądu ustalają wartości prądów fazowych równe wartościom zadany, niezależnie od różnych dla obu kół prędkości kątowych. Realizowany jest w ten sposób mechanizm różnicowy napędu. Dla obliczeń promień skrętu ustalany był przez określenie stałego stosunku prędkości koła zewnętrznego do prędkości koła wewnętrznego. Promień skrętu można wyznaczyć z zależności:

$$R_S = \frac{R_K}{k_S - 1} \quad (42)$$

gdzie:

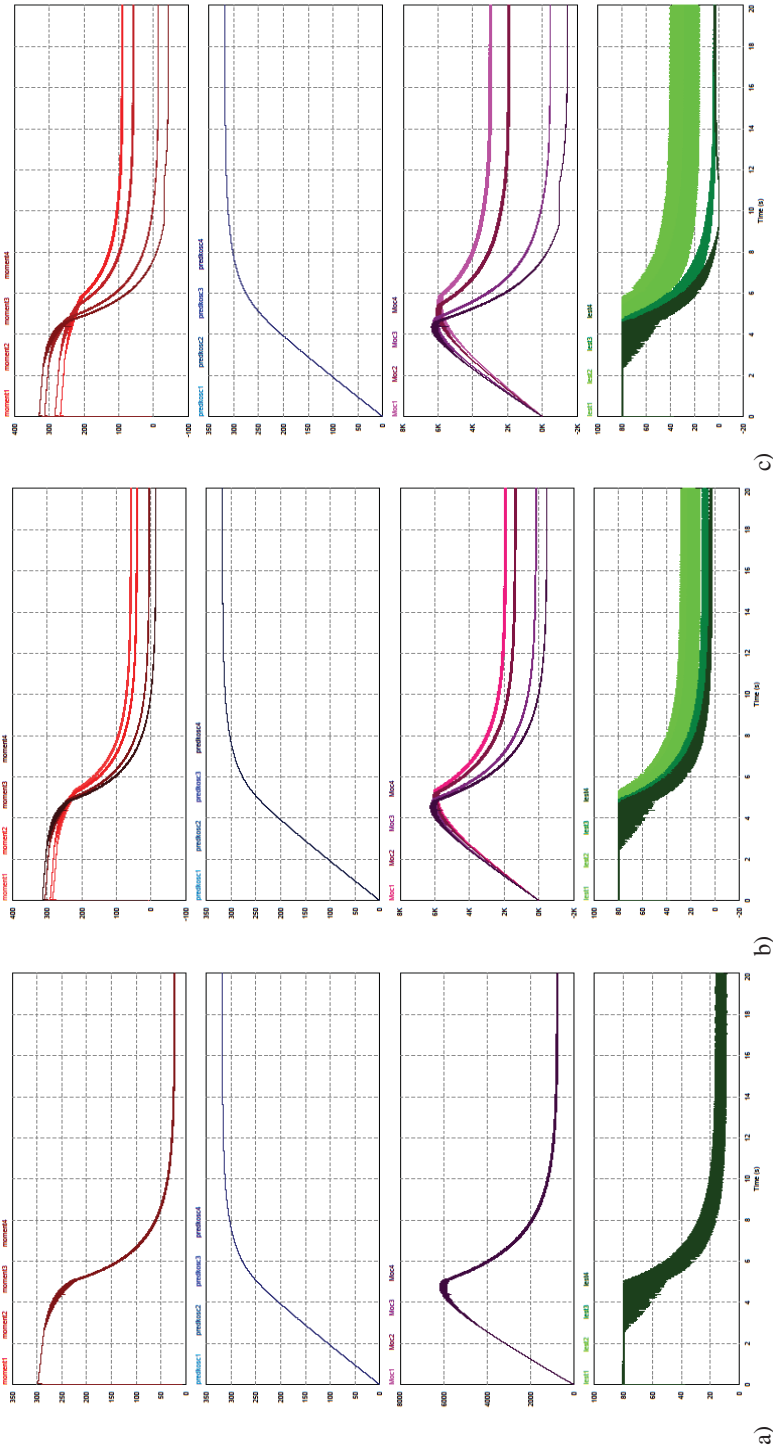
- R_S – promień skrętu,
- R_K – rozstaw kół,
- k_S – stosunek prędkości.

Dla przyjętych danych: $R_K = 1,2$ m i $k_S = 1,2$; otrzymujemy promień skrętu $R_S = 6$ m.

Dla przyjętych danych: $R_K = 1,2$ m i $k_S = 1,5$; otrzymujemy promień skrętu $R_S = 2,4$ m.

Również przy jeździe po łuku rozpatrzono dwa przypadki (rys.11)

- Praca modułów napędowych w zamkniętych pętlach regulacji prądu występująca przy jeździe z prędkością mniejszą od maksymalnej. Prędkości kół prawych są sobie równe i prędkości kół lewych są sobie równe. Natomiast prędkości kół zewnętrznych i wewnętrznych różnią się proporcjonalnie w zależności od promienia skrętu. Ponieważ zadawane prądy silników są takie same, rozwijane momenty napędowe są proporcjonalnie do wartości stałych silników (rys. 13, 14). Moce mechaniczne modułów napędowych zewnętrznych i wewnętrznych są proporcjonalne do prędkości. Przy pracy z zamkniętymi pętlami regulacji prądów można osiągnąć mniejsze promienie skrętu.
- Praca modułów napędowych w otwartych pętlach regulacji prądu występująca przy jeździe z prędkością bliską maksymalnej (rys. 11). W tym przypadku wpływ niejednakowych wartości stałych silników na pracę systemu napędowego jest bardzo duży, nieproporcjonalny do różnic stałych.
- Samo to, że przy jeździe po łuku koła zewnętrzne toczą się szybciej niż wewnętrzne może powodować indukowanie w silnikach zewnętrznych sił elektromotorycznych większych od napięcia zasilającego. Może to powodować pracę generatorową napędów zewnętrznych przy jednoczesnej pracy silnikowej napędów wewnętrznych. Zjawisko to występuje silniej przy mniejszych promieniach skrętu.
- Ponadto jednoczesna praca generatorowa i silnikowa napędów nasila się przy niejednakowych wartościach stałych silników. Silniki w kołach zewnętrznych pracujące generatorowo oddają moc tym większą im większa jest ich stała napięciowa i momentowa. Silniki w kołach wewnętrznych pracujące silnikowo przekazują moment i moc mechaniczną tym większą im mniejsze są ich stałe (rys. 11c).

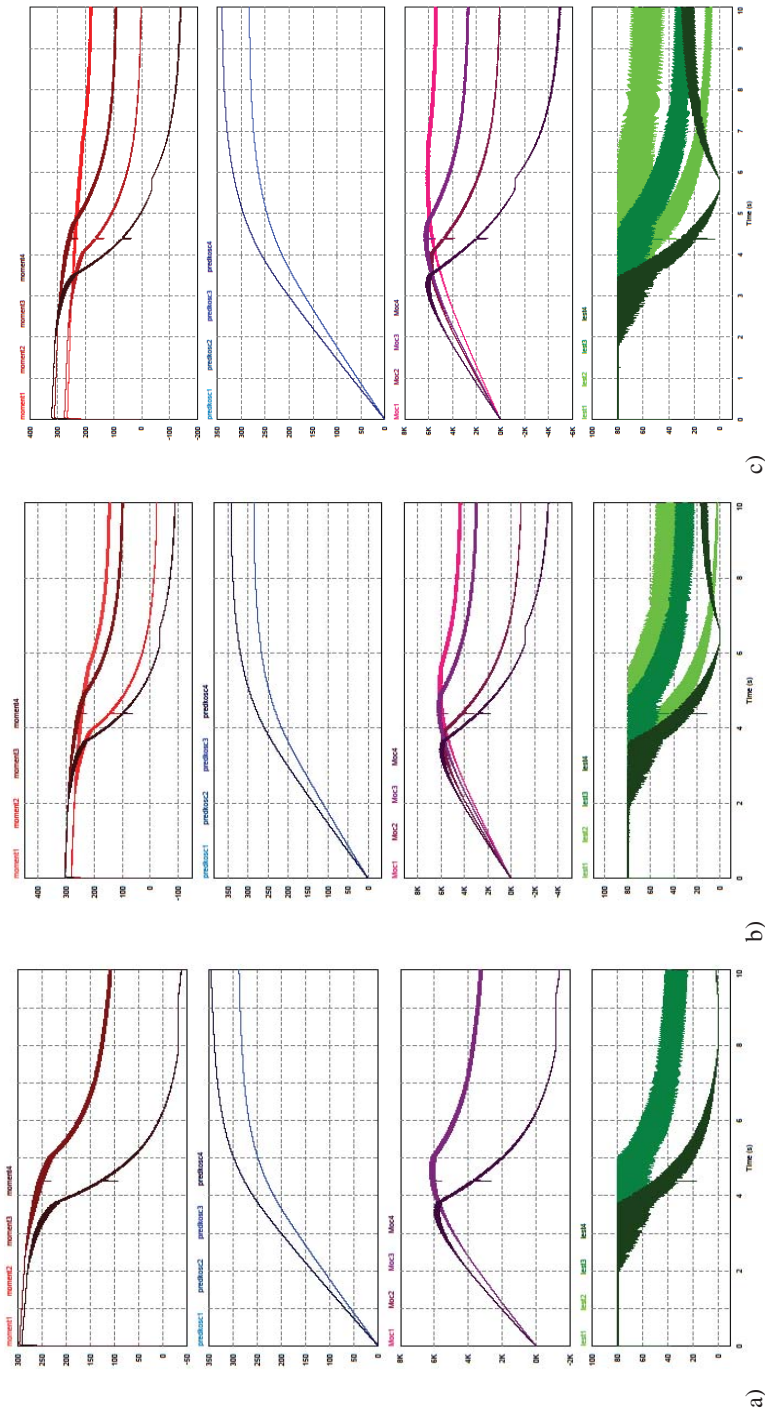


Rys. 10. Symulacja jazdy na wprost podczas rozruchu do prędkości maksymalnej przy różnych wartościach stałych silników:

a) $k_e = 4 \frac{V}{\text{rad/s}}$ i $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{A}$

b) $k_e = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{V}{\text{rad/s}}$
 $k_m = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{\text{Nm}}{A}$

c) $k_e = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{V}{\text{rad/s}}$
 $k_m = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{\text{Nm}}{A}$



Rys. 11. Symulacja pracy napędu podczas jazdy po łuku i rozruchu do prędkości maksymalnej przy różnych wartościach stałych silników. Stosunek prędkości $k = 1, 2$

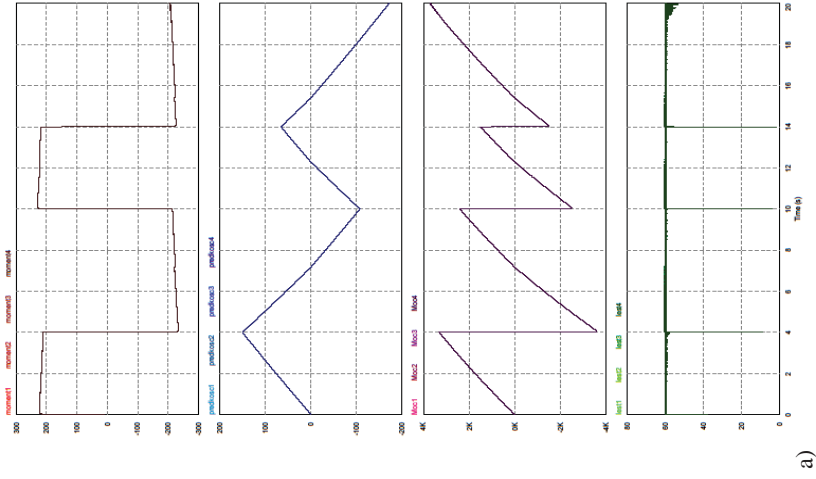
a) $k_e = 4 \frac{V}{\text{rad/s}}$ i $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{A}$

b) $k_e = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{V}{\text{rad/s}}$

$k_m = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{\text{Nm}}{A}$

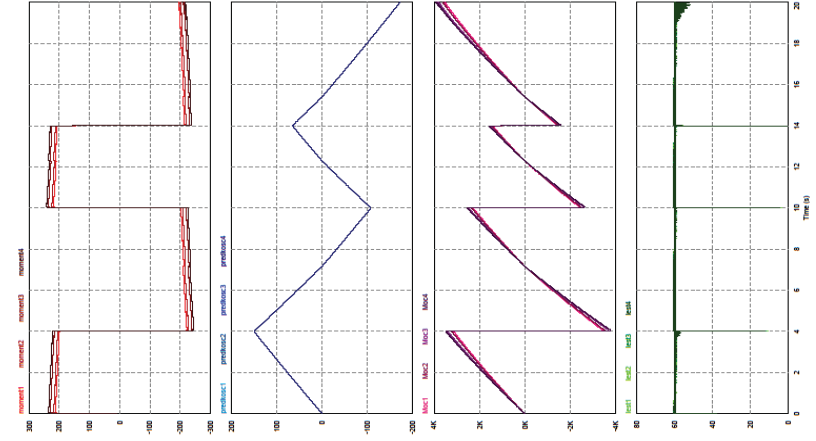
c) $k_e = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{V}{\text{rad/s}}$

$k_m = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{\text{Nm}}{A}$



a)

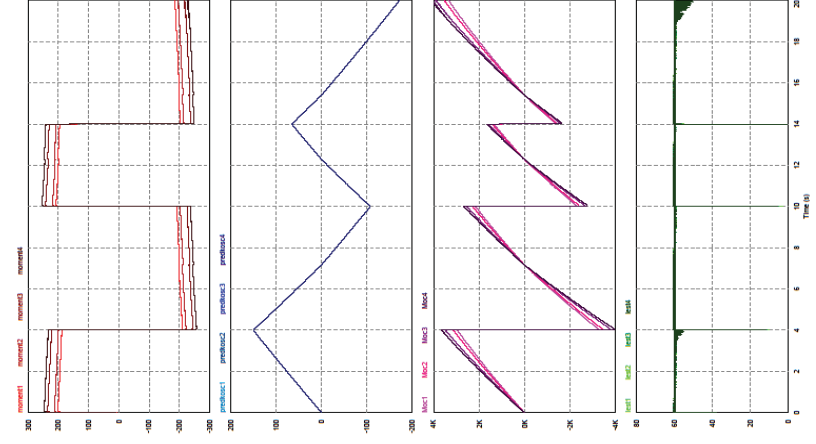
a) $k_e = 4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$ i $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$



b)

b) $k_e = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$

$k_m = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$

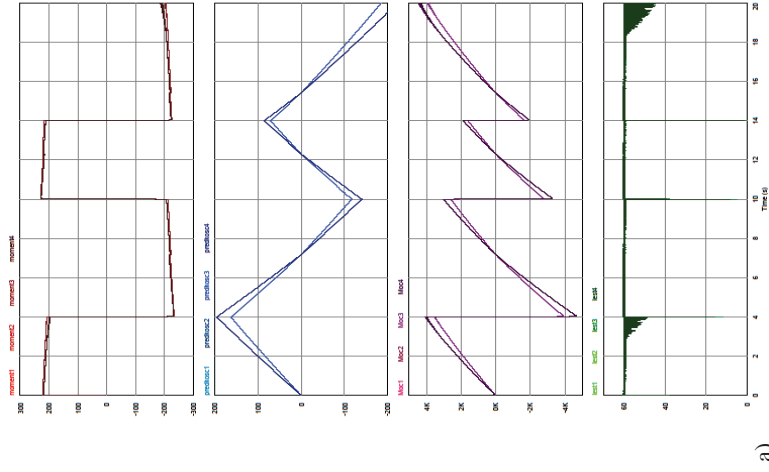


c)

c) $k_e = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{\text{V}}{\text{rad/s}}$

$k_m = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$

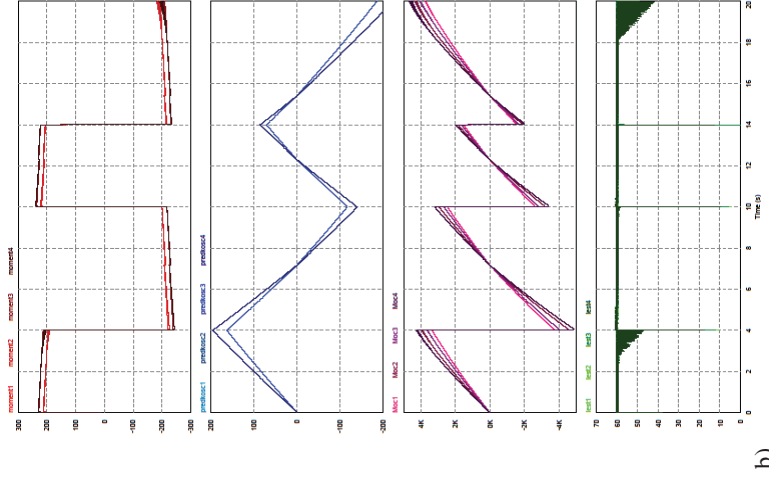
Rys. 12. Symulacja jazdy na wprost przy działaniu zamkniętej pętli regulacji prądu przy różnych wartościach stałych silników



a)

Rys. 13. Symulacja jazdy po łuku działania zamkniętej pętli regulacji prądu przy różnych wartościach stałych silników.
Stosunek prędkości $k = 1, 2$

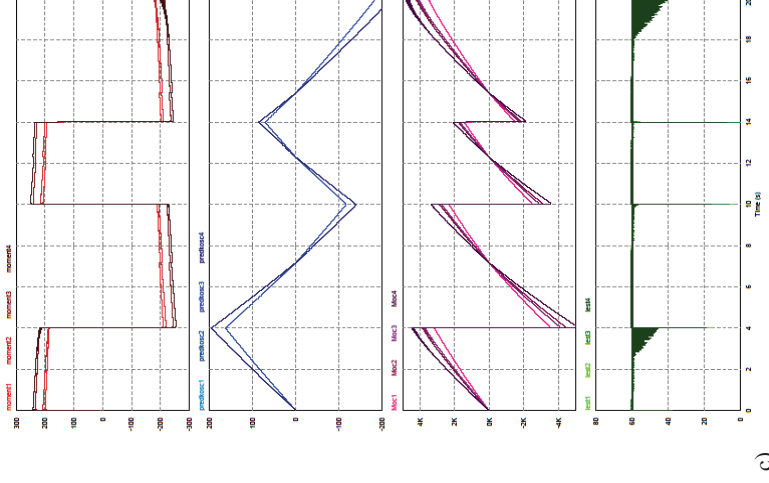
a) $k_e = 4 \frac{V}{\text{rad/s}}$ i $k_m = 4 \frac{\text{Nm}}{A}$



b)

b) $k_e = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{V}{\text{rad/s}}$

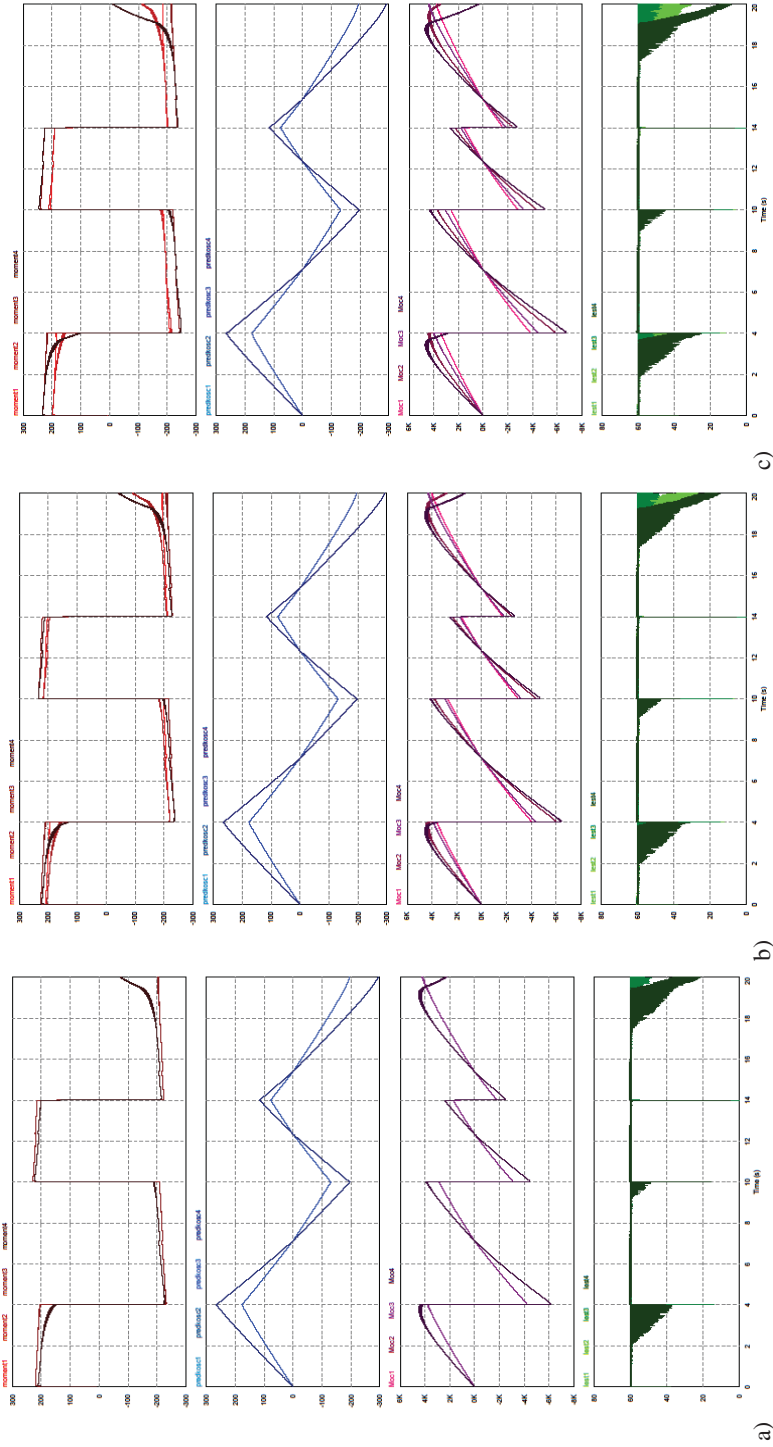
$k_m = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{\text{Nm}}{A}$



c)

c) $k_e = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{V}{\text{rad/s}}$

$k_m = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{\text{Nm}}{A}$



Rys. 14. Symulacja jazdy po łuku działania zamkniętej pętli regulacji prądu przy różnych wartościach stałych silników
 Stosunek prędkości $k = 1, 5$

- a) $k_c = 4 \frac{V}{rad/s}$ i $k_m = 4 \frac{Nm}{A}$
- b) $k_c = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{V}{rad/s}$
 $k_m = 3,8; 3,9; 4,1; 4,2 \frac{Nm}{A}$
- c) $k_c = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{V}{rad/s}$
 $k_m = 3,6; 3,8; 4,2; 4,4 \frac{Nm}{A}$

7. WNIOSKI

Na podstawie zaprezentowanych powyżej wyników symulacji pracy systemu napędowego, w którym zastosowano silniki o niejednakowych parametrach można sformułować następujące wnioski:

- I. Pracę napędów należy podzielić na dwa zakresy:
pierwszy: praca z zamkniętymi pętlami regulacji prądów, gdzie prędkość nie przekracza prędkości znamionowej;
drugi: praca w układzie otwartym z przerwanyimi pętlami regulacji prądów, gdzie prędkości są bliskie prędkości maksymalnej.
Niejednakowe parametry silników wpływają na pracę napędów w różny sposób w zakresie pierwszym i drugim
- II. Podczas pracy w zakresie pierwszym, z zamkniętymi pętlami regulacji prądów wpływ niejednakowych parametrów silników jest niewielki, proporcjonalny do różnic parametrów.
- III. Podczas pracy w zakresie drugim, z przerwanyimi pętlami regulacji prądów wpływ niejednakowych parametrów silników jest duży i decyduje o poprawnej pracy poszczególnych modułów napędowych.
Rozrzut parametrów silników: stałych napięciowych i momentowych powoduje, że momenty rozwijane przez silniki znacznie różnią się od siebie. W skrajnych przypadkach silniki o większych wartościach stałych mogą pracować generatorowo, podczas gdy silniki o mniejszych stałych pracują silnikowo.
- IV. Silniki montowane w napędach wielosilnikowych powinny być dobierane tak, aby ich parametry różniły się nie więcej niż 10% od wartości znamionowych. Dotyczy to w szczególności stałych: momentowej i napięciowej maszyn, których wpływ na pracę napędów jest największy.
- V. Kierowca kierujący pojazdem o napędzie wielosilnikowym powinien mieć świadomość, że jazda z prędkością bliską maksymalnej może mieć niekorzystny wpływ na pracę układu napędowego. Prędkość pojazdu powinna być ograniczana do wartości znamionowej.

LITERATURA

1. Dąbała K, Dudziński J, Rudeński A.: Silniki do napędu bezpośredniego pojazdów elektrycznych. XLIX Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2013, Gdynia-Gdańsk, 17-19 czerwca 2013 r.
2. Dąbała K, Dudziński J.: Napęd bezpośredni w pojazdach samochodowych – przegląd konstrukcji. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 260/2012, s. 257-270.
3. Opracowanie pojazdu z napędem elektrycznym, osobowo-towarowego o masie całkowitej do 1 tony. Sprawozdanie merytoryczne. Project rozwojowy nr N R01 0005 10; Dokumentacja NNE nr: 2131, Nr arch.: 25/2013, Warszawa 2013.
4. Janaszek M, Kwiatkowski K.: Napęd pojazdu turystycznego osobowo-towarowego. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 262/2013, s.17-46.

5. Kaźmierkowski M. P., Krishnan R., Blaabjerg F.: Control In Power Electronics. Selected Problems. Academic Press 2002.
6. Janaszek M.: Experimental drive with direct torque control of permanent magnet synchronous motor. Archives of Electrical Engineering 2001 vol.1
7. Vas P.: Sensorless vector and direct torque control. Oxford University Press 1998.
8. Vas P.: Electrical Machines and Drives. A Space-Vector Theory Approach. Clarendon Press – Oxford 1992.

Rękopis dostarczono dnia 07.01.2015 r.

THE ANALYSIS OF INFLUENCE UNEQUAL PARAMETERS OF MOTORS ON THE WORK OF MULTIMOTORS TRACTION DRIVE

Michał JANASZEK

ABSTRACT *An analysis of the work a four-motor electric traction drive intended for off-road vehicles has been presented in the article. In the drive, a permanent magnet synchronous motors with the reverse construction mounted directly on the drive wheels of the vehicle have been applied. A method of direct current control with voltage vector modulation has been used in the control system. The results of simulation specifying the influence of unequal parameters of synchronous motors on the work of the drive has been presented.*

Keywords: *electric drive, synchronous motor*



Dr inż. Michał JANASZEK ukończył studia w 1974 roku na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej uzyskując dyplom mgr inż. elektryka ze specjalnością automatyka. W październiku 1974 r. rozpoczął pracę w Instytucie Elektrotechniki w Zakładzie Elektrycznych Napędów Obrabiarkowych. Specjalizował się w napędach prądu stałego z tranzystorowymi wzmacniaczami mocy dla obrabiarek sterowanych numerycznie i robotów przemysłowych. Zajmował się identyfikacją parametrów dynamicznych maszyn prądu stałego, oraz numerycznym modelowaniem dynamiki w syntezie układów napędowych. Brał udział w opracowaniu i przygotowaniu do produkcji napędów dla robotów przemysłowych typu IRb, za co otrzymał nagrodę zespołową stopnia III MHiPM za rok 1986. Od lat osiemdziesiątych zajmuje się napędami z silnikami synchronicznymi, w szczególności problemami optymalizacji sterowania. Rozprawę doktorską „Problemy bezpośredniej regulacji momentu i strumienia silnika synchronicznego o magnesach trwałych” obronił w roku 2001 uzyskując stopień naukowy doktora. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji z zakresu napędu elektrycznego. Od kilku lat zajmuje się napędami przeznaczonymi dla pojazdów osobowych, towarowych lub turystycznych. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej.