

Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej

Artykuł prezentuje wyniki symulacji komputerowych nowych układów napędowych przeznaczonych do akumulatorowych lokomotyw kopalnianych o masie 12 ton. Analizy napędu dokonano z zastosowaniem silnika szeregowego prądu stałego, wykorzystywanego powszechnie w obecnie używanych lokomotywach oraz z silnikami prądu zmiennego asynchronicznym klatkowym i synchronicznym z magnesami trwałymi. Przedstawiono uzyskane na drodze symulacji parametry elektryczne i mechaniczne lokomotywy wyposażonej w powyższe typy napędów oraz dokonano porównania uzyskanych wyników. Przedstawione w artykule wyniki symulacji różnych typów układów napędowych lokomotywy pozwalają na dokonanie wyboru typu napędu podczas modernizacji lokomotyw kopalnianych.

1. WSTĘP

Węgiel kamienny jest wydobywany z coraz to głębszych pokładów. Im głębszy pokład tym większe występuje stężenie metanu i w związku z tym wzrasta zagrożenie wybuchem. W kopalniach metanowych (znaczna część obecnie funkcjonujących kopalń węgla kamiennego) do transportu urobku i materiałów na duże odległości są stosowane lokomotywy elektryczne akumulatorowe. Obecnie w polskich kopalniach dominują dwa typy lokomotyw, a mianowicie lokomotywa Lea BM-12 o masie 12 ton oraz lokomotywa Ldag-05 o masie 5,5 tony. Obydwie te konstrukcje pochodzą z lat 60. ubiegłego wieku i nie są już obecnie produkowane. Ich produkcja zakończyła się w latach 90. ubiegłego stulecia. Obecnie w Polsce nie są produkowane lokomotywy elektryczne akumulatorowe, a używane obecnie w kopalniach lokomotywy są już bardzo przestarzałe technologicznie, mocno wyeksploatowane, a tym samym awaryjne i wymagają częstych napraw i remontów. W najbliższym czasie będzie konieczna gruntowna modernizacja układów napędowych obecnie używanych lokomotyw.

Charakterystyka momentu napędowego silnika szeregowego prądu stałego pozwala na stosowanie układów napędowych bez skrzyni biegów. Jest to naj-

ważniejsza zaleta, dzięki której do dnia dzisiejszego w układach napędowych lokomotyw są stosowane silniki szeregowo pomimo istnienia szeregu ich wad.

W przemysłowych układach napędowych, gdzie nie jest wymagana tak szeroka regulacja prędkości obrotowej już dawno silnik prądu stałego został zastąpiony silnikami asynchronicznymi klatkowymi zasilanymi z przekształtników częstotliwości ze sterowaniem wektorowym, gdzie występuje niezależna regulacja momentu i prędkości obrotowej, analogicznie jak w silniku obcowzbudnym prądu stałego. Z kolei w układach napędowych samochodów elektrycznych silnik szeregowy prądu stałego jest często zastępowany silnikiem synchronicznym prądu zmiennego z magnesami trwałymi zasilanym poprzez falownik napięcia ze sterowaniem wektorowym [1]. Rodzi się więc pytanie dlaczego w napędach lokomotyw nadal stosowany jest napęd silnikiem szeregowym prądu stałego? Odpowiedź na to pytanie powinna umożliwić symulacja układów napędowych lokomotywy wyposażonej w powyższe trzy typy silników elektrycznych.

Niniejszy artykuł prezentuje charakterystyczne parametry układów napędowych możliwe do uzyskania w wyniku modernizacji napędu lokomotyw typu Lea BM-12 produkowanych w przeszłości przez firmę KONSTAL. Przedstawione wyniki symulacji nowych układów napędowych porównano ze zmodernizowa-

nym napędem lokomotyw Lea BM-12 stosowanym w końcowym okresie produkcji, kiedy do regulacji prądu silnika napędowego zastosowano łącznik tyrystorowy.

Symulacje komputerowe prowadzono przy użyciu programu symulacyjnego PSIM v.7.1 firmy Powersys Inc. będącego symulatorem układów energoelektronicznych [2].

2. SYMULACJA KLASYCZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY Lea BM-12 Z SILNIKIEM SZEREGOWYM PRĄDU STAŁEGO TYPU LDs 245

Lokomotywa akumulatorowa Lea BM-12 posiada następujące parametry:

Producent i typ	KONSTAL, Lea BM-12
Masa lokomotywy	$M_l = 12,5 \text{ Mg}$
Maksymalna siła pociągowa:	$F_{max} = 30 \text{ kN}$
Prędkość maksymalna	$V_{max} = 6 \text{ m/s}$
Przełożenie przekładni	1 : 19,26
Średnica kół	$d = 560 \text{ mm}$
Napięcie akumulatorów	$U_n = 144 \text{ V}$
Pojemność akumulatorów	$Q = 840 \text{ Ah}$
Prąd maksymalny	$I_{max} = 400 \text{ A}$

Lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-12 jest wyposażona w jeden silnik napędowy; jest to silnik szeregowy prądu stałego o następujących parametrach znamionowych:

Producent i typ	EMIT Żychlin, LDs 245
Moc znamionowa (ciągła)	$P_n = 15,2 \text{ kW}$
Moc znamionowa (jednogodzinna)	$P_{n1h} = 38 \text{ kW}$
Napięcie znamionowe	$U_n = 144 \text{ V}$
Prąd znamionowy (ciągły)	$I_n = 120 \text{ A}$
Prąd znamionowy (jednogodzinny)	$I_{n1h} = 295 \text{ A}$
Moment znamionowy	$M_n = 51 \text{ Nm}$
Prędkość znamionowa	$n_n = 2910 \text{ obr/min}$
Masa	$M = 450 \text{ kg}$

Dane przy obciążeniu znamionowym:

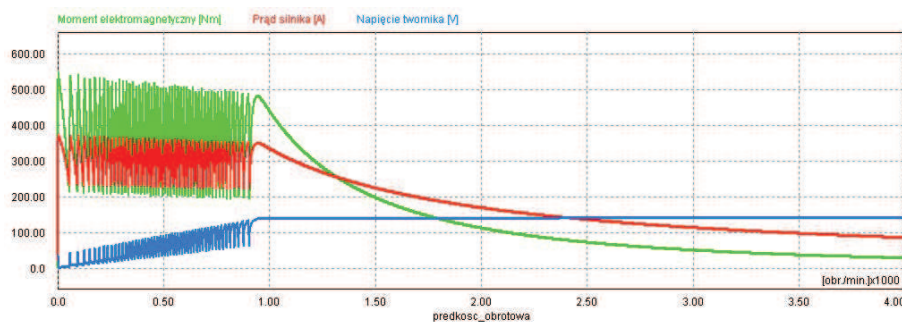
Sprawność $\eta_n = 87,7 \%$

W celu wyznaczenia charakterystyk silnika w całym zakresie prędkości obrotowych należy ustalić występujący w układzie napędowym zakres prędkości użytecznych. Dopuszczalna prędkość liniowa lokomotyw w podziemiach kopalń w Polsce wynosi 6 m/s. Na podstawie przekładni mechanicznej i średnicy kół lokomotywy wyznaczono dla dopuszczalnej prędkości liniowej maksymalną prędkość obrotową silnika napędowego, która wynosi 3940 obr/min. Ponieważ założono to samo przełożenie przekładni mechanicznych i średnicy kół dla wszystkich układów napędowych to wszystkie charakterystyki silników wyznaczono do prędkości obrotowej 4000 obr/min.

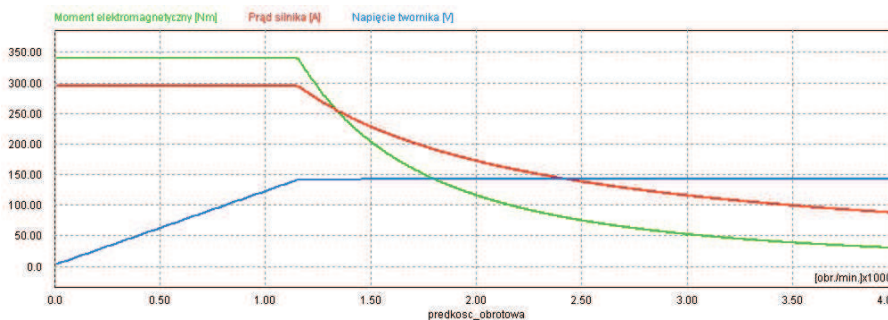
Jako pierwszą przeprowadzono symulację komputerową klasycznego napędu lokomotywy z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 245, zasilanego poprzez łącznik tyrystorowy [3]. W powyższym układzie klasycznym w czasie rozruchu wartość prądu pobieranego przez silnik szeregowy z baterii akumulatorów jest ograniczana przez obwód łącznika tyrystorowego do wartości średniej równej 295 A, będącej wartością prądu jednogodzinnego zastosowanego silnika trakcyjnego. Dla takich warunków zasilania na rysunku 1 jest przedstawiony przebieg momentu obrotowego silnika typu LDs 245 wraz z prądem silnika i napięciem twornika.

Jak wynika z rysunku 1 wartość prądu silnika jest ograniczana do średniej wartości 295 A w ten sposób, że łącznik tyrystorowy jest załączony, gdy wartość prądu silnika nie przekracza wartości średniej równej 295 A o więcej niż 20%. Gdy wartość prądu silnika przekroczy wartość średnią o więcej niż 20%, łącznik tyrystorowy jest wyłączany i prąd silnika maleje.

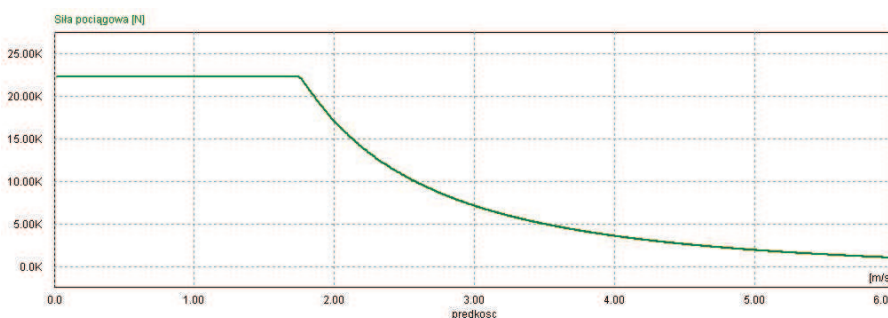
Gdy wartość prądu silnika obniży się poniżej wartości średniej o więcej niż 20%, to łącznik tyrystorowy zostaje włączony. W ten sposób wartość prądu silnika jest stabilizowana pomiędzy wartościami 236 A a 354 A. Taki sposób zasilania silnika powoduje powstanie dużych oscylacji momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik, co jest przedstawione na rys. 1. Można zmniejszyć wartość oscylacji



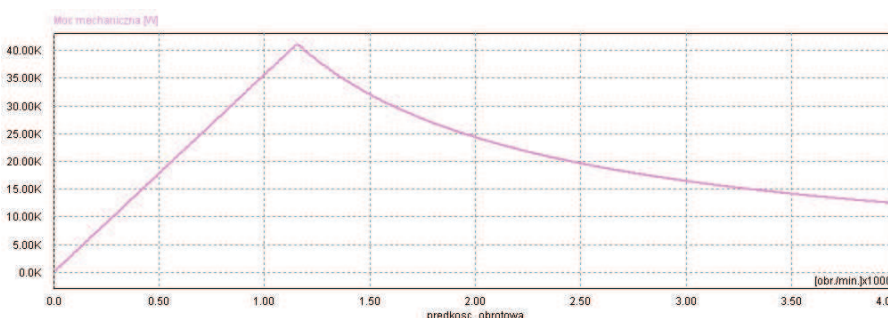
Rys. 1. Charakterystyka silnika LDs 245 zasilanego poprzez łącznik tyrystorowy



Rys. 2. Charakterystyka silnika LDs 245 zasilanego ze źródła prądu



Rys. 3. Siła pociągowa lokomotywy Lea BM-12



Rys. 4. Moc mechaniczna silnika LDs 245

momentu elektromagnetycznego, zawiązując szerokość histerezy łącznika prądu silnika. Ponieważ oscylacje prądu i momentu silnika utrudniają dalszą analizę układu napędowego, na rysunku 2 został przedstawiony wynik symulacji wyidealizowanego układu poprzez zasilenie silnika ze źródła prądu o wartości 295 A o ograniczonej do 144 V wartości napięcia.

Jak wynika z rysunku 2 silnik szeregowy prądu stałego typu LDs 245 zasilany w powyższy sposób rozwija maksymalny moment obrotowy o wartości 340 Nm do prędkości obrotowej wynoszącej 1200 obr/min. Następnie moment obrotowy szybko maleje i dla prędkości obrotowej 3000 obr/min silnik rozwija już tylko około 50 Nm momentu obrotowego.

Taka szybko ustępująca charakterystyka momentu napędowego silnika szeregowego powoduje również szybko ustępującą charakterystykę siły pociągowej lokomotywy, co przedstawia rysunek 3.

Przedstawiona na rysunku 3 charakterystyka siły pociągowej lokomotywy Lea BM-12 wyposażonej w silnik napędowy typu LDs 245 charakteryzuje się stałą siłą pociągową wynoszącą około 22 kN do prędkości 1,7 m/s. Dla wyższych prędkości siła pociągowa lokomotywy szybko maleje i dla prędkości 3,5 m/s wynosi już tylko około 5 kN.

Na rysunku 4 jest przedstawiona moc mechaniczna uzyskiwana przez silnik szeregowy typu LDs 245 zasilany w powyższy sposób.

Jak wynika z rysunku 4 maksymalna wartość mocy mechanicznej uzyskiwanej przez silnik LDs 245 zasilany w powyższy sposób wynosi około 40 kW i jest osiągnięta dla prędkości 1200 obr/min. Dla wyższych prędkości obrotowych moc mechaniczna uzyskiwana na wale silnika szybko maleje i dla prędkości 3000 obr/min nieco przekracza 15 kW.

3. SYMULACJA UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY Z DWOMA SILNIKAMI ASYNCHRONICZNYMI KLATKOWYMI PRĄDU ZMIENNEGO

Jednym z możliwych typów modernizacji lokomotyw kopalnianych akumulatorowych jest zastosowanie do napędu silników asynchronicznych klatkowych zasilanych poprzez falownik napięcia [4,5]. Silniki asynchroniczne klatkowe zasilane poprzez falowniki napięcia są obecnie powszechnie używane do napędu tramwajów miejskich i trolejbusów w miejsce klasycznego napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego [6,7]. Silniki asynchroniczne klatkowe mają mniejszą przeciążalność momentem niż silniki szeregowe prądu stałego. Jak wynika z symulacji klasycznego układu napędowego lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem LDs 245 przedstawionej na rysunku 4. maksymalna moc mechaniczna uzyskiwana na wale silnika wynosi około 40 kW. Lokomotywa posiada dwie osie napędowe, więc ze względów mechanicznych lepiej jest zastosować dwa niezależne układy napędowe dla każdej osi. Również ze względu na bardzo duży moment rozruchowy silnika szeregowego prądu stałego do napędu lokomotywy zdecydowano się zastosować dwa silniki prądu zmiennego, umożliwiające osiągnięcie porównywalnego momentu obrotowego.

Gdyby założyć podobną, do osiąganą przez silnik szeregowy, moc mechaniczną dla napędu z silnikami asynchronicznymi klatkowymi to moc każdego silnika napędowego powinna wynosić 20 kW. Z szeregu produkowanych silników asynchronicznych klatkowych występują silniki o mocy 22 kW o następujących parametrach [8]:

Producent i typ	Celma, dSKg180L4-EPW1-f
Moc znamionowa	$P_n = 22 \text{ kW}$
Napięcie znamionowe	$U_n = 105 \text{ V}$
Prąd znamionowy	$I_n = 147 \text{ A}$
Moment znamionowy	$M_n = 143 \text{ Nm}$
Prędkość znamionowa	$n_n = 1465 \text{ obr/min}$

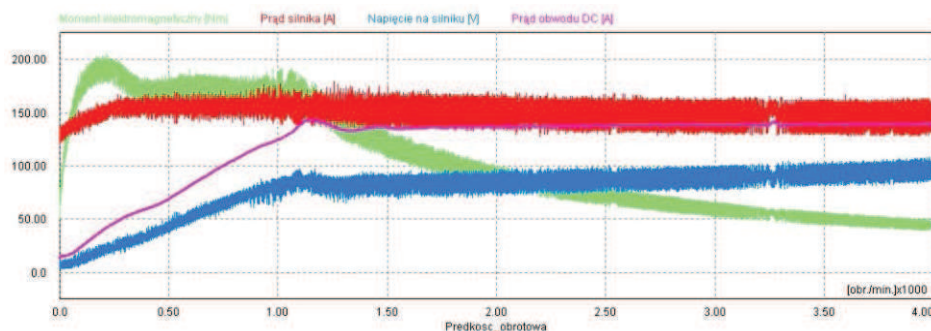
Dane przy obciążeniu znamionowym:

Sprawność	$\eta_n = 91,5 \%$
Współczynnik mocy	$\cos\varphi = 0,9$
Krotności momentów i prądów	
Momentu rozruchowego	$M_r / M_n = 2,5$
Momentu maksymalnego	$M_{max} / M_n = 2,9$
Prądu rozruchowego	$I_r / I_n = 7,2$
Pozostałe dane	
Moment bezwładności	$J = 0,13 \text{ kgm}^2$
Masa	$M = 225 \text{ kg}$

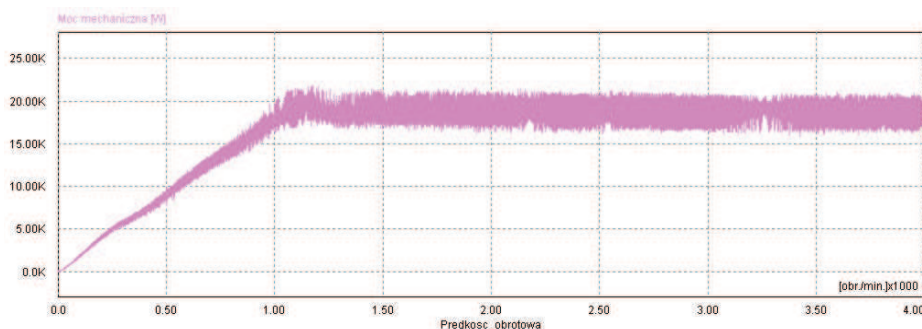
Zastosowane silniki asynchroniczne klatkowe mają masę całkowitą równą masie silnika szeregowego prądu stałego; nie zmienia się więc masa całkowita lokomotywy. Zastosowanie takich silników spowoduje, że nie będą one przeciążane powyżej swojej mocy znamionowej.

Na rysunku 5 została przedstawiona uzyskana na drodze symulacji charakterystyka silnika asynchronicznego klatkowego typu dSKg180L4-EPW1-f produkcji CELMA zasilanego z falownika wektorowego.

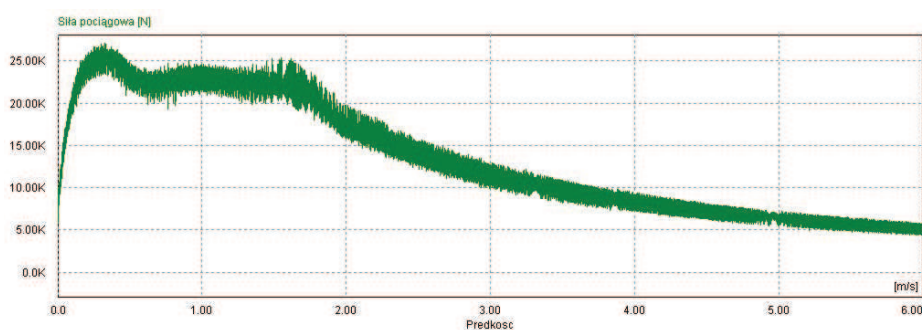
Jak wynika z rysunku 5 falownik wektorowy tak steruje silnikiem napędowym, aby maksymalna wartość momentu elektromagnetycznego nie przekraczała 170 Nm, co dla dwóch układów napędowych daje łącznie 340 Nm, czyli tyle samo co dla napędu klasycznego z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 245. Nie ma więc możliwości wystąpienia poślizgu kół napędowych przy współczynniku tarcia kół o szyny większym od 0,19. Maksymalny prąd silnika w całym zakresie prędkości obrotowych do 4000 obr/min nie przekracza wartości 155 A, co odpowiada wartości 105% prądu znamionowego silnika. Silnik nie jest więc przeciążany prądowo, czyli nie występuje niebezpieczeństwo termicznego uszkodzenia uzwojeń silnika. Napięcie na silniku również w całym zakresie prędkości obrotowych nie przekracza wartości znamionowej silnika równej 105 V. Nie występuje więc możliwość uszkodzenia izolacji uzwojeń silnika. Prąd pobierany przez falownik z obwodu prądu stałego DC w całym zakresie prędkości użytecznej nie przekracza 155 A. Prąd baterii akumulatorów jest równy podwójnej wartości prądu pobieranego przez



Rys. 5. Charakterystyka silnika klatkowego zasilanego przez falownik wektorowy



Rys. 6. Moc mechaniczna silnika klatkowego zasilanego przez falownik wektorowy



Rys. 7. Siła pociągowa lokomotywy z silnikami klatkowymi

falownik z obwodu prądu stałego DC, ponieważ układ napędowy składa się z dwóch identycznych zespołów typu falownik-silnik. Maksymalna wartość prądu baterii akumulatorów wynosi zatem 310 A.

Na rysunku 6 została przedstawiona charakterystyka mocy mechanicznej uzyskiwanej na wale silnika w całym zakresie prędkości użytecznej.

Jak wynika z rysunku 6 moc mechaniczna uzyskiwana na wale silnika w zakresie prędkości od 1200 obr/min do 4000 obr/min jest stała i wynosi 19 kW. Dla dwóch układów napędowych daje to sumaryczną moc równą 38 kW, czyli taką jaką jest szczytowa moc napędu klasycznego z silnikiem szeregowym prądu stałego. Przewaga układu napędowego z silnikami asynchronicznymi klatkowymi nad napędem z silnikiem szeregowym prądu stałego polega jednak na tym, że moc maksymalna utrzymywana jest na stałym poziomie aż do prędkości maksymalnej, a w przypadku silnika szeregowego obniża się ze wzrostem prędkości, co przedstawia rysunek 4. Taka charakterystyka mechaniczna napędu z silnikami asynchronicznymi klatkowymi pozwala uzyskać lepszą charakterystykę trakcyjną lokomotywy dla zakresu średnich i wyższych prędkości.

Na rysunku 7 została przedstawiona charakterystyka siły pociągowej lokomotywy wyposażonej w dwa asynchroniczne klatkowe silniki napędowe o mocy 22 kW każdy, zasilane za pomocą wektorowych falowników napięcia.

Jak wynika z rysunku 7 lokomotywa wyposażona w napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi posiada wyższą w stosunku do lokomotywy z napędem klasycznym siłę pociągową w zakresie średnich i wyższych prędkości. Na przykład dla prędkości 3,5 m/s lokomotywa z silnikami klatkowymi posiada 10 kN siły pociągowej, a lokomotywa z silnikiem szeregowym tylko 5 kN.

4. SYMULACJA UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY Z DWOMA SILNIKAMI SYNCHRONICZNYMI PRĄDU ZMIENNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

Modernizację napędu lokomotyw kopalnianych można również wykonać stosując nowoczesne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi typu PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). Silniki z magnesami trwałymi posiadają najwyższą sprawność spośród wszystkich typów silników. Wynika to z faktu braku uzwojenia w wirniku maszyny, a tym samym braku strat z tym związanych. Silniki PMSM posiadają bardzo dużą dynamikę oraz dużą przeciążalność. Duża dynamika silników PMSM wynika z tego, że pole magnetyczne wzbudzenia silnika pochodzi od magnesów trwałych umieszczonych na wirniku, wytworzenie więc pola magnetycznego przez przepływ prądu w stojanie powoduje natych-

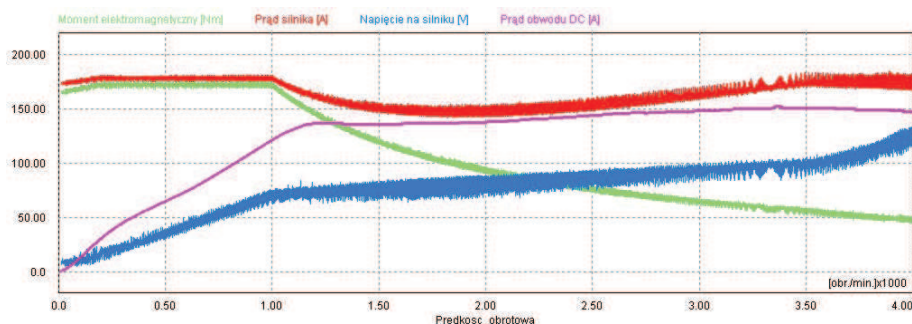
miastowe współdziałanie tych pól i natychmiastowe wytworzenie momentu elektromagnetycznego w silniku. Inaczej jest w silniku asynchronicznym klatkowym, gdzie przepływ prądu w stojanie powoduje wytworzenie pola magnetycznego wzbudzenia silnika i dopiero to wirujące pole magnetyczne wytwarza w prętach klatki wirnika napięcie, a ponieważ pręty tworzą zwartą klatkę to następuje przepływ prądu w klatce wirnika pod wpływem tego napięcia. Wytworzony na zasadzie indukcji prąd klatki wirnika wytwarza własne pole magnetyczne, które zaczyna współdziałać z polem magnetycznym stojana. Wzajemne oddziaływanie pól magnetycznych stojana i wirnika wytwarza moment elektromagnetyczny silnika. Wytworzenie momentu napędowego trwa więc pewien czas.

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi posiada również wady. Główną wadą jest konieczność stosowania falownika do zasilania silnika. Z tego względu silniki z magnesami trwałymi nie są obecnie powszechnie dostępne jako uniwersalne silniki, gdyż bez falownika nie jest możliwy ich rozruch. Drugą poważną wadą silnika z magnesami trwałymi są trudności z pracą powyżej prędkości bazowej. Prędkość bazowa silnika to taka prędkość, przy której pole magnetyczne wytworzone przez magnesy trwałe indukuje w stojanie siłę elektromotoryczną (SEM) równą napięciu znamionowemu silnika. Praca powyżej prędkości bazowej jest możliwa, ale wymaga osłabienia pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe. Aby uzyskać efekt osłabienia pola, falownik zasilający musi wytworzyć składową prądu w osi d (płaszczyzna d-q związana z wirnikiem maszyny elektrycznej), która wywoła składową strumienia magnetycznego skierowaną przeciwnie do pola magnesów. Dzięki osłabieniu pola magnetycznego silnik wytwarza mniejszą SEM i jest możliwy wzrost prędkości obrotowej silnika zasilanego napięciem znamionowym [9]. Ze względu na bardzo duży moment rozruchowy silnika szeregowego prądu stałego do napędu lokomotywy zdecydowano się zastosować dwa silniki PMSM, umożliwiające osiągnięcie porównywalnego momentu obrotowego, o następujących parametrach:

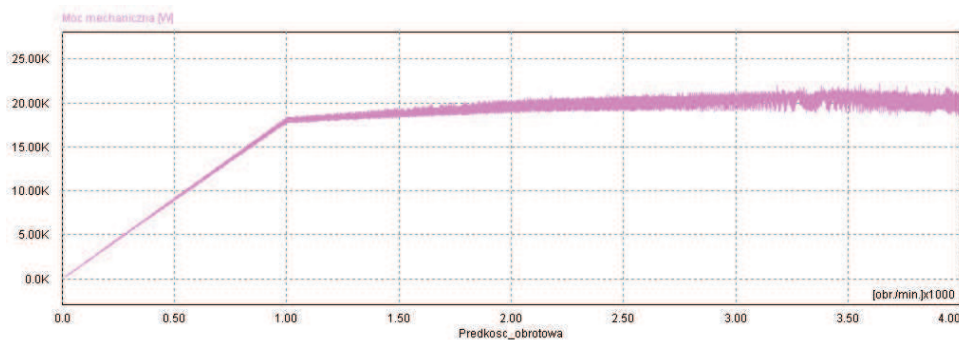
Producent i typ	KOMEL, prototyp
Moc znamionowa	$P_n = 19 \text{ kW}$
Napięcie znamionowe	$U_n = 88 \text{ V}$
Prędkość znamionowa	$n_n = 1500 \text{ obr/min}$
Pozostałe dane	
Moment bezwładności	$J = 0,23 \text{ kgm}^2$

Na rysunku 8 jest przedstawiona uzyskana na drodze symulacji charakterystyka prototypu silnika PMSM o mocy 19 kW zasilanego poprzez falownik wektorowy.

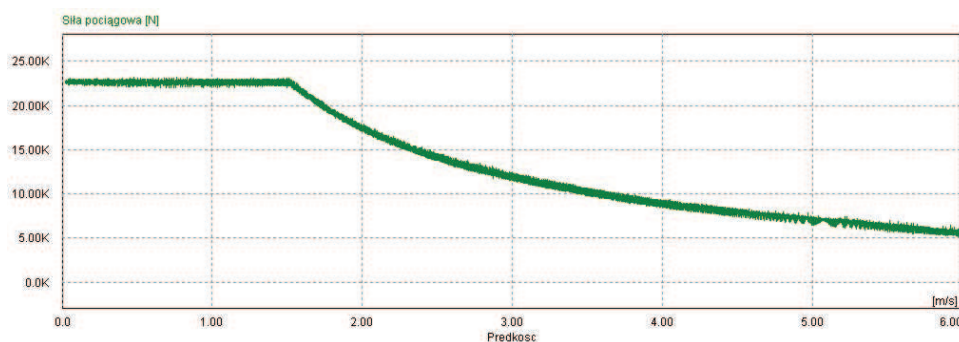
Jak wynika z rysunku 8 falownik w pierwszej strefie sterowania do 1000 obr/min utrzymuje stałą wartość składowej prądu i_q silnika odpowiedzialną za wytworzenie momentu elektromagnetycznego, aby utrzymać stałą wartość momentu równą 170 Nm. W drugiej strefie sterowania powyżej 1000 obr/min moment elektromagnetyczny maleje odwrotnie proporcjonalnie do wzrostu prędkości. Prąd silnika w pierwszej strefie jest stały i wynosi około 175 A. W drugiej strefie prąd silnika najpierw lekko maleje do 150 A, a potem wzrasta z powodu rosnącej składowej prądu i_d odpowiedzialnej za osłabianie pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe, osiągając wartość 175 A powyżej prędkości 3500 obr/min. Prąd pobierany przez falownik z obwodu prądu stałego DC w całym zakresie prędkości użytecznej nie przekracza 150 A. Prąd baterii akumulatorów jest równy podwójnej wartości prądu pobieranego przez falownik z obwodu prądu stałego DC, ponieważ układ napędowy składa się z dwóch identycznych zespołów typu falownik-silnik. Maksymalna wartość prądu baterii akumulatorów wynosi zatem 300 A. Napięcie na silniku rośnie, osiągając wartość znamionową 88 V przy około 3000 obr/min. Powyżej 3500 obr/min wartość napięcia zaczyna znacznie przekraczać napięcie znamionowe silnika, zaczynają występować trudności z osłabianiem pola magnetycznego. Przed stawiony kształt prądu silnika wynika z zastosowanego typu silnika PMSM o niejednakowej indukcyjności wirnika w osi d i q. Na skutek występowania momentu reluktancyjnego maksymalny moment jest uzyskiwany, gdy wskaz prądu jest odchyłony o 145 stopni elektrycznych od pola magnesów [10].



Rys. 8. Charakterystyka silnika PMSM zasilanego przez falownik wektorowy



Rys. 9. Moc mechaniczna silnika PMSM zasilanego poprzez falownik wektorowy



Rys. 10. Siła pociągowa lokomotywy z silnikami PMSM

Na rysunku 9 przedstawiono charakterystykę mocy mechanicznej uzyskiwanej na wale silnika w całym zakresie prędkości użytecznej, przy powyższym sposobie sterowania.

Jak przedstawia rysunku 9 na końcu pierwszej strefy sterowania uzyskujemy moc 18 kW. W drugiej strefie moc lekko wzrasta, stabilizując się na 20 kW.

Na rysunku 10 została przedstawiona charakterystyka siły pociągowej lokomotywy wyposażonej w dwa silniki napędowe z magnesami trwałymi PMSM o mocy 19 kW każdy, zasilane za pomocą wektorowych falowników napięcia.

Jak wynika z rysunku 10 lokomotywa wyposażona w napęd z silnikami PMSM posiada podobną w stosunku do lokomotywy z napędem z silnikami asynchronicznymi klatkowymi siłę pociągową w zakresie średnich i wyższych prędkości. W zakresie niskich prędkości siła pociągowa jest znacznie lepsza, podobnie jak dla lokomotywy wyposażonej w silnik szeregowy prądu stałego.

5. PODSUMOWANIE

Porównując symulowane układy napędowe można stwierdzić, że układy napędowe z silnikami prądu zmiennego zasilane poprzez falowniki napięcia pozwalają na uzyskiwanie znacząco (średnio

o 70%) wyższych prędkości transportowych składów pociągów w stosunku do napędu klasycznego z silnikiem szeregowym prądu stałego. Wyższa prędkość transportowa lokomotywy z napędem z silnikami prądu zmiennego jest uzyskiwana dzięki utrzymywaniu stałej mocy napędu, pomimo zwiększania prędkości, co nie jest możliwe dla napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego. Należy również zaznaczyć, że uzyskiwanie wyższych prędkości transportowych nie powoduje większego zużycia ładunku elektrycznego z baterii akumulatorów na trasie transportowej.

Podobne zużycie ładunku elektrycznego z baterii akumulatorów dla napędu z silnikami asynchronicznymi prądu zmiennego o wyższej sprawności ($\eta_n = 91,5\%$) w stosunku do napędu z silnikiem prądu stałego ($\eta_n = 87,7\%$) jest związane z dodatkowymi stratami mocy w tranzystorowym falowniku napięcia. W układzie klasycznego napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego przy średnich i wyższych prędkościach, przy których silnik pracuje na swojej charakterystyce naturalnej następuje mostkowanie łącznika tyrystorowego i tym samym eliminacja występujących podczas jego pracy strat energii. W układzie napędowym z silnikami prądu zmiennego falownik napięcia musi pracować cały czas, poza tym 6-tranzystorowy mostek falownika napięcia charakteryzuje się większą mocą strat niż łącznik tyrystorowy. Tak więc pomimo wyższej sprawności silników

prądu zmiennego, sprawność całego układu napędowego jest podobna.

W przypadku napędu z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zużycie ładunku na trasie transportowej jest niższe o parę procent, ze względu na wyższą sprawność silników z magnesami trwałymi. Jest to jednak różnica na tyle mała, że nie ma ona większego znaczenia praktycznego.

Zastosowanie hamowania z odzyskiem energii kinetycznej składu pociągu i przekazaniem do baterii akumulatorów pozwala na odzyskanie do 55% ładunku zużytego na rozpędzanie składu pociągu. Jednak w całym bilansie energetycznym trasy transportowej na rozpędzanie jest zużywane tylko około 3% ładunku. Tak więc zastosowanie hamowania odzyskowego pozwala zmniejszyć zużycie ładunku o mniej niż 2% ładunku elektrycznego zużywanego z baterii akumulatorów na całej trasie transportowej.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że modernizacja układu napędowego lokomotywy elektrycznej kopalnianej typu Lea BM-12 przy pomocy zarówno silników asynchronicznych klatkowych, jak i silników z magnesami trwałymi zasilanymi poprzez falowniki napięcia daje podobne rezultaty, przy czym silniki asynchroniczne klatkowe są ogólnie dostępne, natomiast silniki z magnesami trwałymi są obecnie wytwarzane tylko na zamówienie. Zastosowanie silników z magnesami trwałymi ma również dodatkowe wady, a mianowicie potrzeba głębokiego wejścia do drugiej strefy sterowania, konieczna w napędach lokomotyw, wiąże się z pewnymi konsekwencjami, a nawet zagrożeniami. Głębokie osłabienie pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe wiąże się z koniecznością wytworzenia dużej składowej i_d prądu. Składowa i_q prądu pozostaje w drugiej strefie stała, aby uzyskać stałą wartość mocy mechanicznej. To powoduje wzrost prądu całkowitego silnika, a tym samym

straty i zwiększone nagrzewanie się stojana. Dodatkowe zagrożenie występuje, gdy nastąpi awaryjne wyłączenie falownika zasilającego silnik w czasie jazdy lokomotywy z dużą prędkością. Wtedy na zaciskach silnika pojawia się dużo większe od napięcia zasilania napięcie silnika pracującego prądnicowo z pełnym polem wzbudzenia od magnesów trwałych.

Literatura

1. Strony internetowe poświęcone samochodom elektrycznym: <http://www.auto-elektryczne.pl/sam.html>
2. Symulator układów energoelektronicznych PSIM v.7.1: <http://www.powersimtech.com/download.html>
3. Grunwald Z.: Napęd Elektryczny. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
4. Plamitzer A. M.: Maszyny Elektryczne. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
5. Kalus M., Skoczkowski T.: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
6. Materiały o napędach tramwajów i trolejbusów na stronach internetowych firmy MEDCOM: http://www.medcom.com.pl/main/produkty_trakcja_kolejowa.php
7. Materiały o zmodernizowanych napędach tramwajów i trolejbusów na stronach internetowych Zakładu Elektroniki Przemysłowej ENIKA Sp. z o.o.: <http://www.enika.pl/tresc/9/>
8. Strony internetowe producenta silników elektrycznych firmy CELMA S.A.: <http://www.cantonigroup.com/pl/motors/celma/series/109/trójfazowe-silniki-klatkowe-przeciwwybuchowe-dla-przemyslugorniczego/>
9. Strony internetowe Branżowego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Maszyn Elektrycznych KOMEL: http://www.komel.katowice.pl/pm_maszyny.html
10. Rossa R., Król E.: Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, s.125-129.

Recenzent: doc. dr inż. Franciszek Szczucki