

Wpływ stopnia wzbudzenia silnika trakcyjnego na parametry użytkowe lokomotywy kopalnianej i składu pociągu

The Impact of Traction Motor Excitation upon Performance Parametres of a Coal Mine Locomotive and Train

Artykuł prezentuje wpływ zmiany stopnia wzbudzenia napędowego silnika szeregowego prądu stałego na uzyskiwane przez lokomotywę kopalnianą i skład pociągu parametry trakcyjne. Zmiana stopnia wzbudzenia silnika szeregowego prądu stałego powoduje zmianę ukształtowania momentu napędowego silnika względem uzyskiwanej prędkości obrotowej i prądu silnika. Ma to decydujący wpływ na uzyskiwaną wartość przyspieszenia oraz prędkość maksymalną lokomotywy i całego składu pociągu. Zmiany charakterystyki prędkości obrotowej i momentu silnika trakcyjnego na skutek zmian stopnia wzbudzenia pozwalają na dobór parametrów trakcyjnych lokomotywy i składu pociągu. Przedstawiona w artykule analiza wyników symulacji komputerowych pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących optymalnego doboru stopnia wzbudzenia silnika szeregowego prądu stałego w zależności od oczekiwanych parametrów trakcyjnych stawianych lokomotywie i składowi pociągu w trudnych warunkach kopalnianych.

The article presents the impact of the change of drive excitation of DC series motor upon traction parametres obtained by a coal mine locomotive and train. The change in level of DC series motor excitation causes a change in the way thrust torque is shaped against engine rotational speed and current of the engine. It is of crucial importance upon received acceleration value and maximum speed of the locomotive and the entire train. Changes in engine speed and the torque of traction motor characteristics resulting from the changes in the level of excitation allow the choice traction parametres of locomotive and train. The analysis of computer simulation results presented in the article allows drawing conclusions regarding optimal choice of the level of DC series motor excitation depending on expected traction parametres of the locomotive and train in difficult coal mine environment.

1. WPROWADZENIE

Węgiel kamienny jest obecnie wydobywany z coraz głębszych pokładów. Im głębszy pokład, tym większe są koszty drążenia szybu, dlatego też pokłady

1. INTRODUCTION

Coal is currently extracted from deeper and deeper seams. The deeper the seam, the higher the costs of shaft excavating, therefore coal seams are extracted

węgla są udostępniane z istniejących już szybów, często z bardzo odległych ścian. Transport urobku z odległych od szybów ścian nierzadko wykonywany jest z użyciem lokomotyw kopalnianych ciągnących długie składy wagonów. Jeśli pokład nie jest metanowy, to lokomotywa może być zasilana z sieci trakcyjnej. W ubiegłym wieku do pracy w polskich kopalniach powstało wiele typów lokomotyw przewodowych, takich jak: Ld-10, Ld-20, Ld-21, Ld-30 oraz Ld-31. Do napędu tych lokomotyw służą silniki szeregowego prądu stałego. Charakterystyka momentu napędowego silnika szeregowego prądu stałego pozwala na stosowanie układów napędowych bez skrzyni biegów. Jest to najważniejsza zaleta, dzięki której do dnia dzisiejszego w układach napędowych lokomotyw są stosowane silniki szeregowo pomimo wielu ich wad [3, 4, 5]. 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 przemienników częstotliwości ze sterowaniem wektorowym, gdzie występuje niezależna regulacja momentu i prędkości obrotowej, analogicznie jak w silniku obcowzbudnym prądu stałego.

Obecnie w Polsce podejmowane są próby modernizacji lokomotyw elektrycznych przewodowych, gdyż znaczna część używanych aktualnie w kopalniach lokomotyw jest już bardzo przestarzała technologicznie, mocno wyeksploatowana, a tym samym są awaryjne i wymagają częstych napraw oraz remontów [7]. Pojawiają się nowe rozwiązania lokomotyw przewodowych typu Ld-31EM wyposażonych w napęd elektryczny z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi [1].

Znaczącą liczbę lokomotyw przewodowych typu EE-90 wdrożyła firma DESIM Sp. z o.o. w kopalniach miedzi [6]. Lokomotywa ta jest napędzana dwoma silnikami asynchronicznymi klatkowymi zasilanymi z falowników napięcia. Zastosowane algorytmy z regulacją stałomomentową pozwalają na efektywne wykorzystanie układów napędowych tych lokomotyw.

Aktualnie w wyrobiskach o stopniu niebezpieczeństwa „a” wybuchu metanu powszechnie są stosowane remontowane lokomotywy typu Ld-31, dla których w niniejszym artykule przedstawiono możliwości optymalizacji pracy silników napędowych.

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY

Lokomotywa przewodowa typu Ld-31 jest wyposażona w dwa silniki napędowe typu LDa-327a.

from already existing shafts, often from very distant longwalls. The transport of excavated material from longwalls located far away from the shafts is often performed by means of coal mine locomotives pulling long trains. If the seam is not methane-free, this locomotive may be powered by means of contact line. In the last century, a variety of trolley locomotives were created to work in Polish coal mines, such as: Ld-10, Ld-20, Ld-21, Ld-30 and Ld-31. These locomotives are powered by DC series motors. The properties of drive torque of DC series motor allow using drive mechanism without gearbox. It is the most important advantage, thanks to which until today drive mechanisms of locomotives make use of series motors despite a number of their disadvantages [3,4,5]. In industrial drive mechanisms, where such a wide rotational speed regulation is not required, DC motors have long been replaced by asynchronous squirrel-cage motors powered by frequency inverters with vector control, with independent torque and motor speed regulation, similarly to separately excited DC motor.

Currently in Poland, there are attempts to modernize electric trolley locomotives, as locomotives used currently in coal mines are technologically outdated, heavily exploited and consequently prone to failure and they need frequent repair and renovation works [7]. There are new solutions, such as trolley locomotives type Ld-31EM equipped with electric drive with synchronous motors with permanent magnets [1].

A number of trolley locomotives type EE-90 were implemented by DESIM Sp. z o.o. in copper mines [6]. This locomotive is driven by two inverter-powered squirrel-cage asynchronous motors. Applied algorithms with constant-torque regulation allow efficient use of drive mechanisms of these locomotives.

Presently in workings with “a” level methane threat, the most commonly used are renovated locomotives type Ld-31. Possibilities of optimization of propulsion engines work for these locomotives are presented in the present article.

2. MATHEMATICAL MODEL OF A LOCOMOTIVE PROPULSION ENGINE

Trolley locomotive Ld-31 is equipped with two propulsion engines type LDa-327a. LDa-327a are DC series motors with the following ratings according to [2]:

Silniki typu LDa-327a są silnikami szeregowymi prądu stałego i charakteryzują się następującymi parametrami znamionowymi wg [2]:

Moc znamionowa:	$P_N = 25/45$ kW (S1/S2-60)
Napięcie znamionowe:	$U_N = 250$ V
Prąd znamionowy:	$I_N = 107/205$ A (S1/S2-60)
Moment znamionowy:	$M_N = 168/398$ Nm (S1/S2-60)
Prędkość obrotowa maksymalna:	$n_{MAX} = 2600$ obr./min.
znamionowa:	$n_N = 1420/1080$ obr./min. (S1/S2-60)
Sprawność znamionowa:	$\eta_N = 86/87\%$ (S1/S2-60)
Stopień wzbudzenia min./znam./max.:	50/65/150%
Masa:	$M = 645$ kg,

gdzie S1 oznacza parametry pracy ciągłej, a S2-60 – parametry pracy dorywczej (tzw. godzinowej).

Do przeprowadzenia symulacji komputerowych został stworzony model matematyczny silnika LDa-327a w programie symulacyjnym PSIM firmy Powersys Inc., będący symulatorem układów energoelektronicznych [8]. Dostępny w tym programie model silnika prądu stałego jest modelem liniowym. Na potrzeby symulacji został jednak stworzony nieliniowy model silnika szeregowego prądu stałego, ponieważ model liniowy nie oddawał w sposób wystarczająco dokładny charakterystyk elektromechanicznych silnika LDa-327a.

Na rys. 1. zostały przedstawione charakterystyki uzyskane dla nieliniowego modelu matematycznego silnika LDa-327a przy 100-procentowym stopniu wzbudzenia. Ukazane tam charakterystyki prędkości obrotowej, momentu obrotowego, mocy mechanicznej i sprawności silnika LDa-327a przedstawione są względem prądu twornika, będącego jednocześnie prądem wzbudzenia dla 100-procentowego stopnia wzbudzenia. Uzyskane charakterystyki nie różnią się o więcej niż o 10% w całym zakresie użytecznych prądów twornika (40-240 A) od charakterystyk zamieszczonych w [2].

Zostały również opracowane w programie symulacyjnym nieliniowe modele matematyczne silnika LDa-327a dla stopni wzbudzenia wynoszących 50%, 65% i 80%, które charakteryzują się odpowiednio zmienionymi parametrami symulacyjnymi.

Rated power:	$P_N = 25/45$ kW (S1/S2-60)
Rated voltage:	$U_N = 250$ V
Rated current:	$I_N = 107/205$ A (S1/S2-60)
Rated torque:	$M_N = 168/398$ Nm (S1/S2-60)
Rotational speed maximum:	$n_{MAX} = 2600$ rpm.
rated:	$n_N = 1420/1080$ rpm. (S1/S2-60)
Rated efficiency:	$\eta_N = 86/87\%$ (S1/S2-60)
Excitation level min. / rated / max.:	50/65/150 %
Mass:	$M = 645$ kg,

whereas S1 stands for continuous operation parameters, and S2-60 stands for parameters of short time operation (so called hourly).

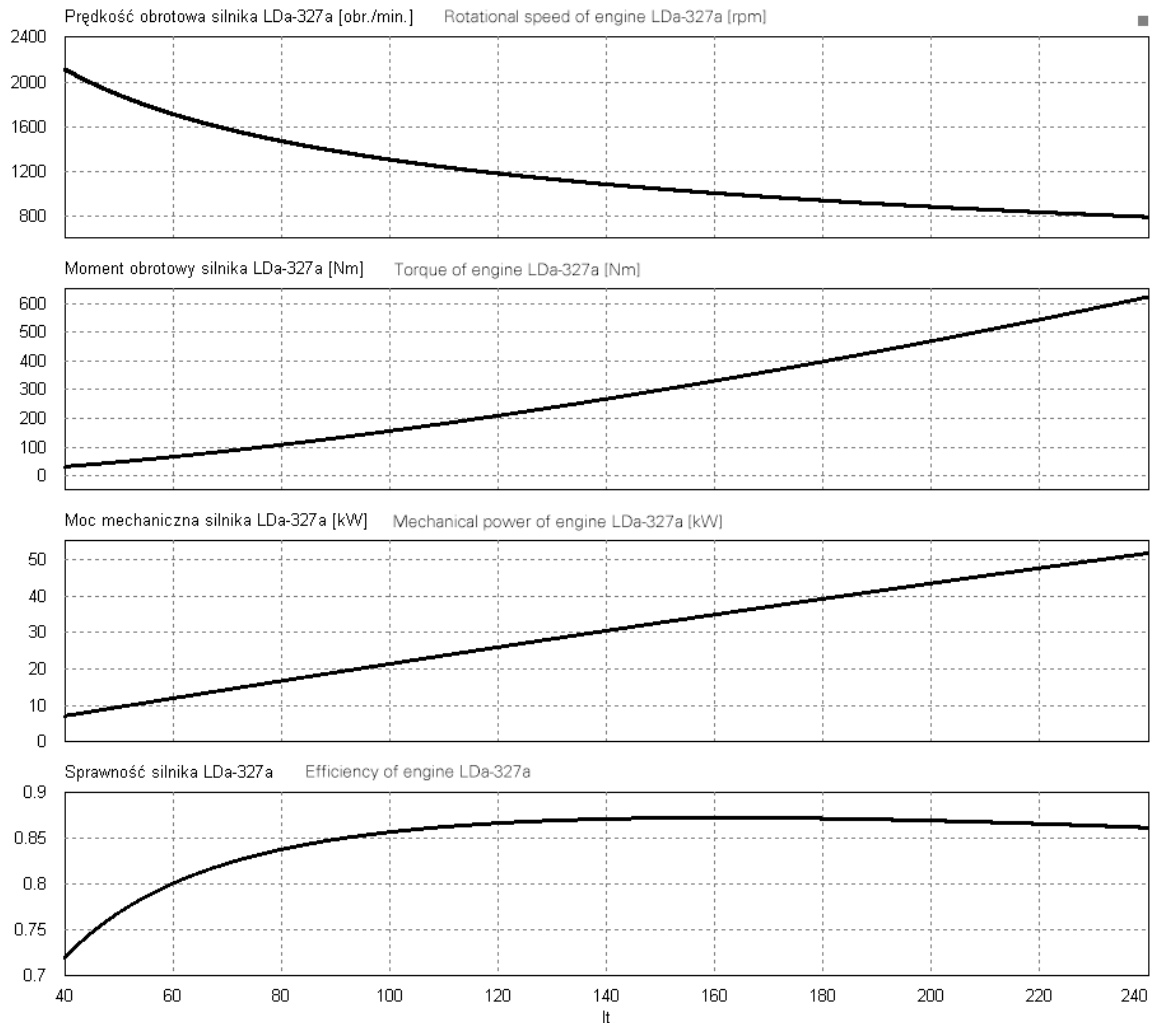
In order to perform the computer simulation, a mathematical model of engine LDa-327a was created by means of simulation program PSIM by Powersys Inc., which is a simulator of power electronics systems [8]. The model of DC engine available in this software is a linear model. However, for the purposes of the simulation a non-linear model of DC series motor was created, since the linear model did not reflect in an appropriate way the electromechanical properties of the engine LDa-327a.

Fig. 1 presents characteristics obtained for non-linear mathematical model of engine LDa-327a at 100% level of excitation.

The properties of engine speed, torque, mechanical power and efficiency of engine LDa-327a which appear in fig. 1, are presented for the armature current, which is simultaneously excitation current for 100% level of excitation.

Achieved characteristics do not differ more than 10% in the entire range of useful armature currents (40-240A) from characteristics in [2].

Non-linear mathematical models of engine LDa-327a for 50%, 65% and 80% levels of excitation have also been prepared in the simulation program. They are characterized by respectively changed simulation parameters.



Rys. 1. Charakterystyki silnika LDA-327a przy 100-procentowym wzbudzenia [2]
 Fig. 1. Characteristics of engine LDA-327a at 100% level of excitation [2]

3. MODEL SYMULACYJNY NAPĘDU LOKOMOTYWY LD 31 I SKŁADU POCIĄGU

Lokomotywa przewodowa typu Ld-31 jest wyposażona w dwa silniki napędowe typu LDA-327a i posiada następujące parametry mechaniczne, które zostały wykorzystane do opracowania modelu matematycznego lokomotywy:

Masa:	14 Mg
Średnica kół jezdnych:	720 mm
Przełożenie przekładni głównej:	1:12,1

Do przeprowadzenia symulacji jazdy lokomotywy i składu pociągu stworzono model matematyczny napędu lokomotywy Ld 31, składający się z silnika LDA-327a i układu przeniesienia napędu na koła lokomotywy oraz model matematyczny oporów ruchu składu pociągu wynikający z ukształtowania torowiska w symulatorze PSIM. Przyjęto równomierne obciążanie się silników napędowych, a więc momenty

3. SIMULATION MODEL OF THE DRIVE OF LOCOMOTIVE LD 31 AND TRAIN

Trolley locomotive Ld-31 is equipped with two propulsion engines type LDA-327a and has the following mechanical parameters, which were used to prepare a mathematical model of the locomotive:

Mass:	14 Mg
Wheel chocks diameter:	720 mm
Adapted final drive ratio:	1:12,1

In order to make a simulation of the locomotive and train operation, a mathematical model of the locomotive Ld31, consisting of the engine LDA-327a and transmission system on the wheels of the locomotive as well as mathematical model of resistance of the movement of the train resulting from railway track topography in the PSIM simulator were created. It was assumed that loading of propulsion engines will be even, therefore load torque and moment of

obciążenia i momenty bezwładności wynikające z oporów trakcyjnych, masy lokomotywy oraz składu pociągu zostały podzielone na dwa silniki napędowe.

Symulacje prowadzono dla trzech różnych warunków obciążenia lokomotywy:

1. Rozpędzanie samej lokomotywy o masie 14 Mg i jazda po płaskiej trasie o długości 1000 m.
2. Rozpędzanie lokomotywy obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 40 Mg i jazda na trasie transportowej o łącznej długości 1000 m po wzniosie torowiska o nachyleniu 4 promili.
3. Rozpędzanie lokomotywy obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg i jazda na trasie transportowej o łącznej długości 1000 m po upadzie torowiska o nachyleniu 4 promili.

Maksymalne dopuszczalne nachylenie torowiska w podziemiach kopalń wynosi 5 promili, a przypadki 2. i 3. odpowiadają typowym warunkom transportu węgla w kopalni.

Symulacje komputerowe jazdy lokomotywy i składu pociągu były prowadzone dla czterech stopni wzbudzenia silnika napędowego typu LDa-327a z zakresu dopuszczalnych podanych przez producenta, a mianowicie:

- dla pełnego – 100%,
- dla niepełnego – 80%,
- dla znamionowego – 65%,
- dla minimalnego – 50%.

Na rys. 2-4. zostały przedstawione przykładowe wyniki symulacji jazdy lokomotywy i składu pociągu przy stopniu wzbudzenia silnika LDa-327a wynoszącym 100%. Prąd rozruchowy silnika został ograniczony w tym przypadku do wartości 185 A, ponieważ przy tym prądzie silniki napędowe wytwarzają na tyle duży moment napędowy, że następuje zerwanie przyczepności kół lokomotywy przy współczynniku tarcia kół o szyny wynoszącym 0,2.

Rys. 2. przedstawia wynik rozpędzania samej lokomotywy o masie 14 Mg po płaskim terenie. W wyniku rozpędzania po 102 sekundach silnik osiąga maksymalną dopuszczalną prędkość obrotową wynoszącą według producenta 2600 obr./min i mógłby dalej zwiększać swoją prędkość do wartości ustalonej 2616 obr./min, jednak ze względów bezpieczeństwa należy uniemożliwić dalszy wzrost prędkości obrotowej silnika. Dla tej ustalonej prędkości sumaryczny prąd silników napędowych stabilizuje się na wartości 53,2 A. Dla maksymalnej dopuszczalnej prędkości obrotowej silnika wynoszącej 2600 obr./min, przy przekładni głównej lokomotywy wynoszącej 1:12,1 i średnicy kół jezdnych 720 mm maksymalna liniowa prędkość lokomotywy wynosi 8,1 m/s.

inertia resulting from traction resistances, locomotive and train mass, were divided into two propulsion engines.

Simulations were performed for three different conditions of locomotive load:

1. Speed build-up of the locomotive itself, 14 Mg mass, and the operation by even track, 1000 m long.
2. Speed build-up of a locomotive loaded with empty wagons with a total mass 40 Mg and its operation by transport track, 1000 m long, on the uplift of the railway track with 4 per mille inclination.
3. Speed build-up of a locomotive loaded with full wagons with a total mass 100 Mg and its operation by transport track, 1000 m long, on the decline of the railway track with 4 per mille inclination.

Maximum allowed inclination of the railway track in the underground sections of coal mines is 5 per mille, and cases 2 and 3 reflect typical conditions of coal transport in a mine.

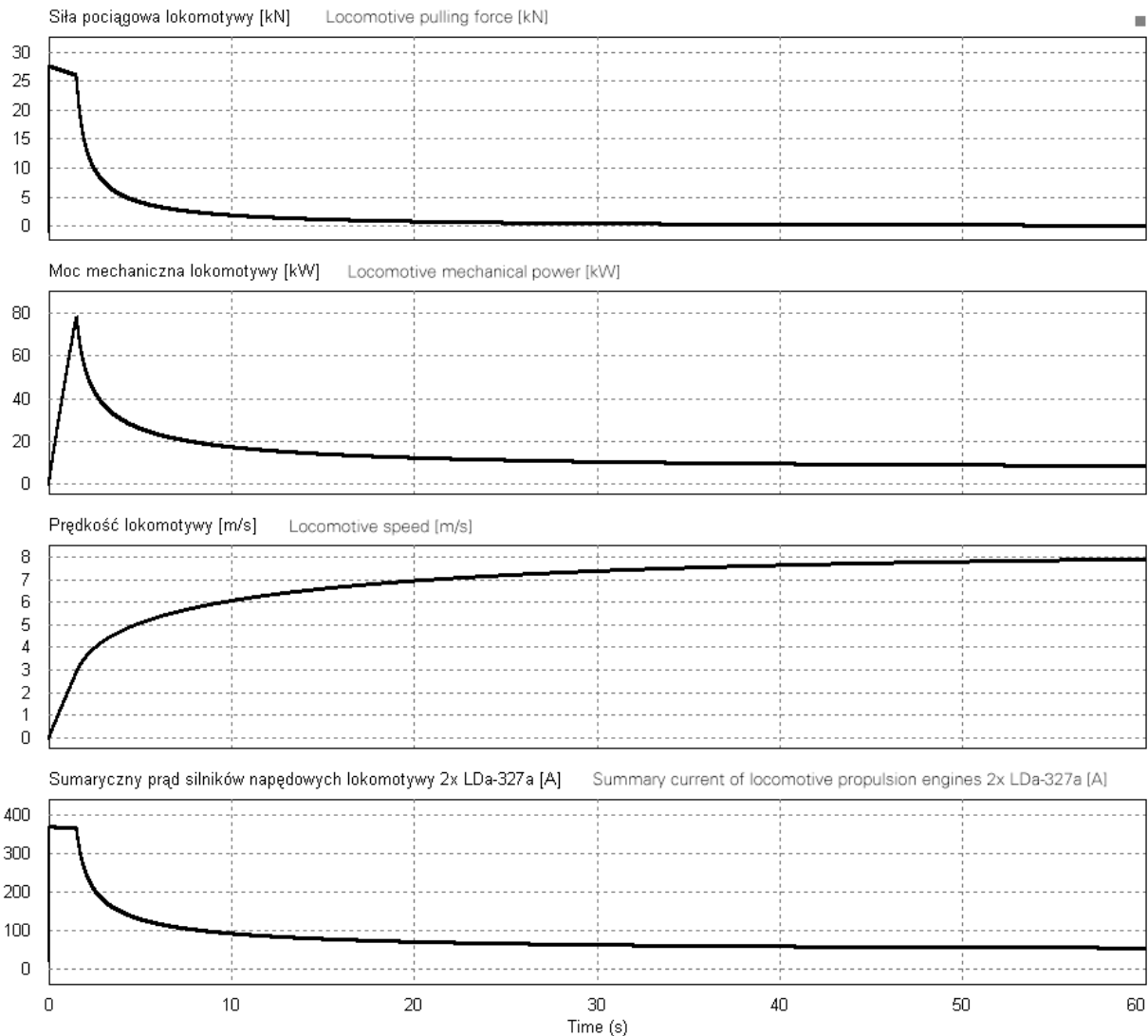
Computer simulations of the locomotive and train operation were performed for four level of excitation of propulsion engine type LDa-327a out of the acceptable range given by the manufacturer, namely:

- for the full - 100%,
- for not full - 80%,
- for the rated - 65%,
- for the minimum - 50%.

Figs. 2-4 present sample results of locomotive and train operation simulation with 100% level of excitation of the engine LDa-327a.

Starting current of the engine was limited in this case to the value of 185 A, since with this current value propulsion engines produce drive torque strong enough to loosen the locomotive wheel grip at the coefficient of friction between the wheels and the rails of 0.2.

Fig. 2 presents the result of speed build-up of the locomotive alone by an even track. As a result of speed build-up, after 102 seconds the engine reaches maximum allowed rotational speed which, according to the manufacturer, is 2,600 rpm and could further increase the speed to the set speed of 2,616 rpm, however for safety reasons, further increase of the rotational speed of the engine must be prevented. For this set speed, summary current of propulsion engines is stabilized at the value of 53.2 A. For the maximum allowed engine rotational speed of 2,600 rpm with the final drive ratio of 1:12.1 and wheel chocks diameter 720mm, maximum linear speed of the locomotive amounts to 8.1 m/s.



Rys. 2. Rozpędzanie lokomotywy Ld 31 o masie 14 Mg wyposażonej w dwa silniki napędowe typu LDa-327a po płaskim terenie [4]

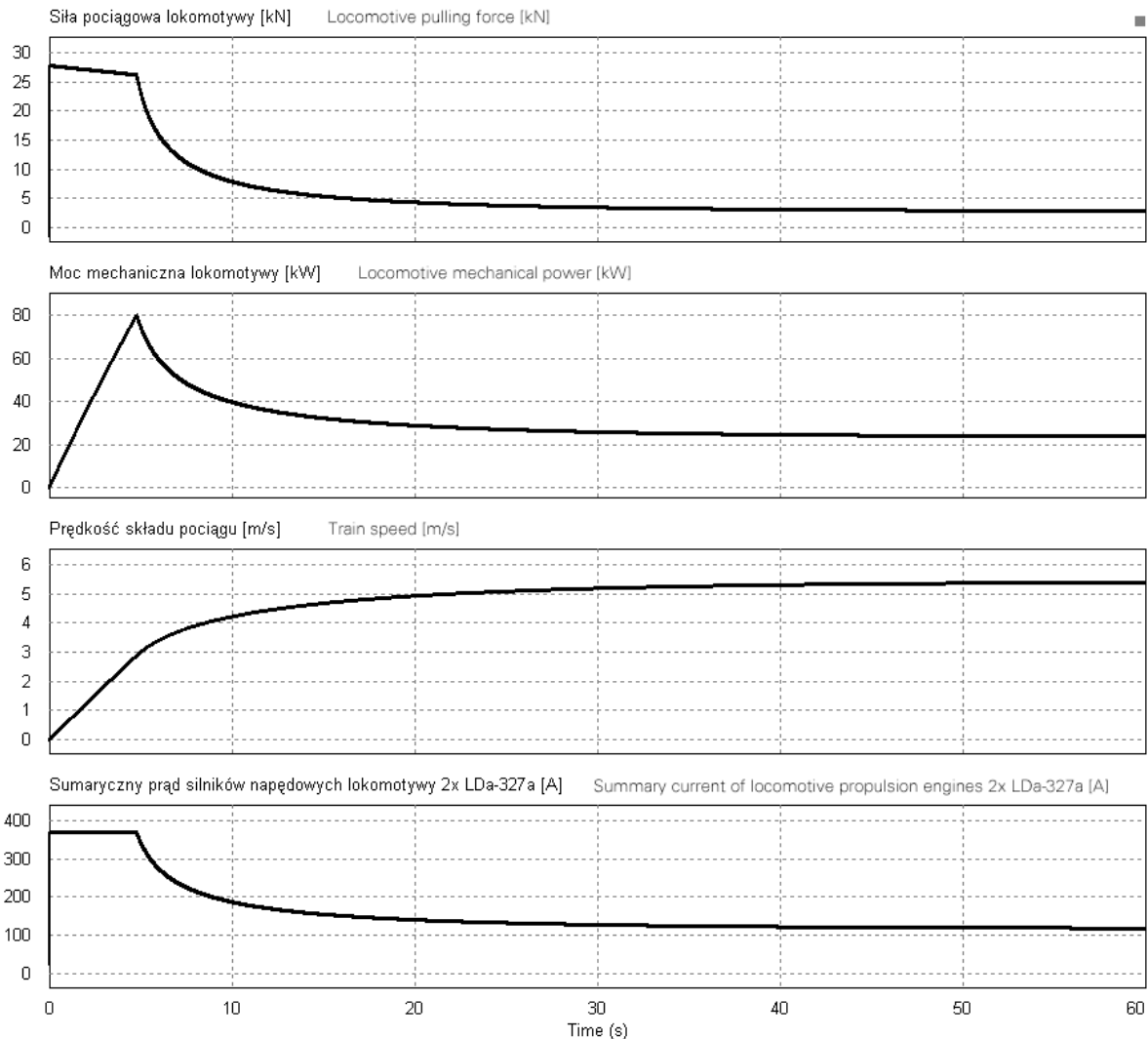
Fig. 2. Speed build-up of the locomotive Ld 31 with the mass of 14 Mg equipped with two propulsion engines type LDa-327a by an even track [4]

Rys. 3. przedstawia wynik rozpędzania lokomotywy obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 40 Mg po wzniosie torowiska o nachyleniu 4 promili. W tym przypadku skład pociągu po około 90 sekundach osiąga maksymalną prędkość 5,42 m/s, przy której silnik napędowy uzyskuje prędkość obrotową 1740 obr./min, znacznie niższą od dopuszczalnej.

Rys. 4. przedstawia wynik rozpędzania lokomotywy obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg po upadzie torowiska o nachyleniu 4 promili. W tym przypadku po około 190 sekundach skład pociągu osiąga maksymalną prędkość 6 m/s, przy której silnik napędowy uzyskuje prędkość obrotową 1928 obr./min, czyli niższą od dopuszczalnej.

Fig 3. presents the result of speed build-up of a locomotive loaded with empty wagons with a total mass 40 Mg on the uplift of the railway track with 4 per mille inclination. In this case, the train reaches maximum speed of 5.42 m/s, after approx. 90 seconds, where the propulsion engine reaches rotational speed of 1740 rpm, much lower than allowed.

Fig 4. presents the result of speed build-up of a locomotive loaded with full wagons with a total mass 100 Mg on the decline of the railway track with 4 per mille inclination. In this case, the train reaches maximum speed of 6 m/s, after approx. 190 seconds, where the propulsion engine reaches rotational speed of 1928 rpm, much lower than allowed.



Rys. 3. Rozpędzanie lokomotywą Ld 31 pustego składu pociągu o masie całkowitej 40 Mg po wzniosie torowiska o nachyleniu 4 promili [4]

Fig. 3. Speed build-up of a locomotive Ld31 loaded with empty wagons with a total mass 40 Mg on the uplift of the railway track with 4 per mille inclination [4]

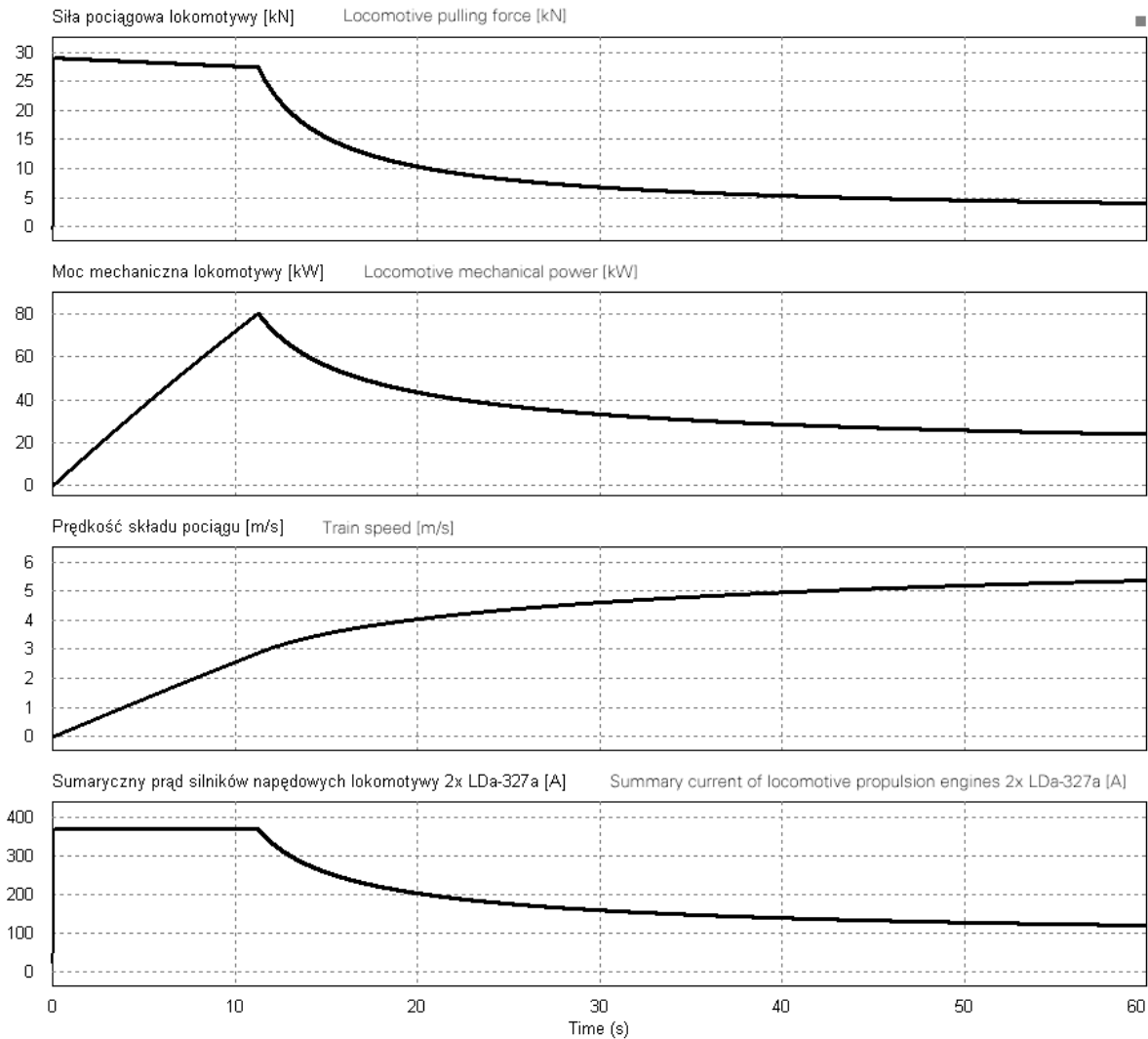
4. PORÓWNANIE PARAMETRÓW TRAKCYJNYCH UZYSKIWANYCH PRZEZ LOKOMOTYWĘ LD 31 I SKŁAD POCIĄGU

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych i analiz zostało dokonane zestawienie parametrów trakcyjnych uzyskiwanych przez lokomotywę Ld 31 i skład pociągu dla czterech wartości stopnia wzbudzenia silników napędowych typu LDa-327a. Uzyskane wartości zamieszczono w tabelach 1-3.

4. COMPARISON OF TRACTION PARAMETERS ACHIEVED BY THE LOCOMOTIVE LD 31 AND THE TRAIN

As a result of performed simulation studies and analyses, a breakdown of traction parameters achieved by the locomotive Ld 31 and the train was done for four values of excitation of propulsion engines type LDa-327a.

The achieved values are in tables 1-3.



Rys. 4. Rozpędzanie lokomotywą Ld 31 pełnego składu pociągu o masie całkowitej 100 Mg po upadzie torowiska o nachyleniu 4 promili [4]
 Fig. 4. Speed build-up of a locomotive Ld31 loaded with empty wagons with a total mass 100 Mg on the decline of the railway track with 4 per mille inclination [4]

Tabela 1.
Porównanie parametrów trakcyjnych uzyskiwanych przez lokomotywę Ld 31 jadącą po płaskim terenie na trasie o długości 1000 m [4]
Table 1.
Comparison of achieved traction parameters by the locomotive Ld 31 operating on an even track on the distance of 1,000 m [4]

Stopień wzbudzenia	Excitation level	50%	65%	80%	100%
Prędkość maksymalna [m/s]	Maximum speed [m/s]	10,59	9,57	8,74	8,15
Przyśpieszenie maksymalne [m/s ²]	Acceleration maximum [m/s ²]	1,99	2	2,03	1,97
Maksymalna siła pociągowa [kN]	Maximum pulling power [kN]	27,9	28	28,3	27,6
Maksymalna sumaryczna wartość prądu silników [A]	Maximum summary value of engine currents [A]	470	430	400	370
Zużycie energii elektrycznej [kWh]	Energy consumption [kWh]	0,687	0,656	0,635	0,624

Tabela 2.

Porównanie parametrów trakcyjnych uzyskiwanych przez skład pociągu o masie całkowitej 40 Mg jadący na trasie o długości 1000 m po wzniosie o nachyleniu 4 promili [4]

Table 2.

Comparison of achieved traction parameters by the train with a total mass of 40 Mg operating on the distance of 1,000 m on the uplift of 4 per mille [4]

Stopień wzbudzenia	Excitation level	50%	65%	80%	100%
Prędkość maksymalna [m/s]	Maximum speed [m/s]	6,89	6,28	5,78	5,42
Przyspieszenie maksymalne [m/s ²]	Acceleration maximum [m/s ²]	0,632	0,634	0,643	0,624
Maksymalna siła pociągowa [kN]	Maximum pulling power [kN]	28,1	28,1	28,5	27,8
Maksymalna sumaryczna wartość prądu silników [A]	Maximum summary value of engine currents [A]	470	430	400	370
Zużycie energii elektrycznej [kWh]	Energy consumption [kWh]	1,841	1,792	1,76	1,744

Tabela 3.

Porównanie parametrów trakcyjnych uzyskiwanych przez skład pociągu o masie całkowitej 100 Mg jadący na trasie o długości 1000 m po upadzie o nachyleniu 4 promili [4]

Table 3.

Comparison of achieved traction parameters by the train with a total mass of 100 Mg operating on the distance of 1,000 m on the decline of 4 per mille [4]

Stopień wzbudzenia	Excitation level	50%	65%	80%	100%
Prędkość maksymalna [m/s]	Maximum speed [m/s]	7,48	6,88	6,38	6
Przyspieszenie maksymalne [m/s ²]	Acceleration maximum [m/s ²]	0,268	0,269	0,273	0,265
Maksymalna siła pociągowa [kN]	Maximum pulling power [kN]	29,3	29,4	29,8	29
Maksymalna sumaryczna wartość prądu silników [A]	Maximum summary value of engine currents [A]	470	430	400	370
Zużycie energii elektrycznej [kWh]	Energy consumption [kWh]	2,117	1,966	1,851	1,779

Analizując wartości zamieszczone w tabelach 1-3., można stwierdzić, że w przypadku jazdy samej lokomotywy występuje realne niebezpieczeństwo przekroczenia dopuszczalnej prędkości obrotowej silnika LDA-327a, która została określona przez producenta na 2600 obr./min. W przypadku przełożenia przekładni 1:12,1 przy średnicy kół jezdnych 720 mm daje to maksymalną prędkość użytkową lokomotywy wynoszącą 8,1 m/s. Zgodnie z tabelą 1. przy każdym analizowanym stopniu wzbudzenia silnika może być ona przekraczana. Musi zatem być w lokomotywie realizowany pomiar prędkości i dokonywane ograniczanie jej wartości.

Kolejny ważny parametr stanowiący o dynamice lokomotywy i składu pociągu to osiągnięte przyspieszenie, które pozostaje w bezpośrednim związku z siłą pociągową, jaką dysponuje lokomotywa. Najmniejszym przyspieszeniem charakteryzuje się skład pociągu ładownego, co prezentuje tabela 3. Silniki napędowe dysponują na tyle dużym momentem napędowym, że bez ograniczania wartości ich prądu z łatwością lokomotywa zrywa przyczepność kół do szyn i wpada w poślizg. Aby uniknąć tego niekorzystnego zjawiska, moment napędowy silników

As a result of the analysis of values in tables 1-3 it may be stated that in case of operation of locomotive alone there is a real hazard of exceeding the accepted rotational speed of the engine LDA-327a, which was defined by the producer as 2,600 rpm. In case of final drive ratio of 1:12.1 with the wheel chocks diameter 720 mm it gives a maximum locomotive speed amounting to 8.1 m/s. According to table 1, it may be exceeded at every analyzed level of engine excitation. Therefore, speed must be measured and its value limited in every locomotive.

Another important parameter crucial for the dynamics of the locomotive and the train is the achieved acceleration, which is in direct relationship with pulling power of the locomotive. The lowest acceleration belongs to the loaded train, which is presented by table 3. Propulsion engines' drive torque is sufficient to loosen the locomotive wheel grip with the rails and make the wheels slip. In order to avoid this adverse phenomenon, the drive torque of engines was limited by means of limiting the current of engines. The pulling force of the locomotive was also limited. If we assume that the coefficient of friction between the wheels and dry rails of 0.2 is the peak value achieved

został zmniejszony poprzez ograniczenie prądu silników. Siła pociągowa lokomotywy została również ograniczona. Jeżeli przyjąć wartość 0,2 współczynnika tarcia kół o suche szyny jako maksymalną praktycznie osiąganą w kopalni, to dla masy lokomotywy wynoszącej 14 Mg maksymalna siła pociągowa lokomotywy wyniesie 27,5 kN. Ponieważ siła pociągowa lokomotywy wraz ze wzrostem prędkości maleje, co przedstawiają rys. 2., 3. i 4., to dla każdego z analizowanych stopni wzbudzenia silników napędowych tak ograniczono maksymalną wartość prądu, aby dla zerowej prędkości wartość momentu napędowego silników pozwalała nieco przekraczać wyżej podaną maksymalną wartość siły pociągowej lokomotywy. Spowoduje to, że na suchym torowisku o współczynniku tarcia kół lokomotywy o szyny wynoszącym założone 0,2 koła lokomotywy znajdują się na granicy przyczepności. Otrzymamy w ten sposób maksymalną wartość momentu napędowego silników, która pozwoli na ruszanie lokomotywą bez utraty przyczepności kół na suchym torowisku.

Zgodnie z powyższymi założeniami, analizując dane zamieszczone w przedstawionych tabelach, dochodzi się do wniosku, że najlepszym i wystarczającym stopniem wzbudzenia silników napędowych jest zastosowanie 100-procentowego wzbudzenia. Przy tym stopniu wzbudzenia silników trakcyjnych występuje ponadto najniższe zużycie energii elektrycznej przez lokomotywę na trasie transportowej.

5. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych analiz i symulacji komputerowych można stwierdzić, że w przypadku zastosowania do transportu urobku w pokładach niemetanowych kopalń węgla kamiennego lokomotyw przewodowych typu Ld 31 napędzanych silnikami typu LDa-327a optymalnym ze względu na zużycie energii elektrycznej na trasie transportowej jest stosowanie stopnia wzbudzenia 100% silnika napędowego.

Ze względu na uzyskiwane prędkości jazdy składów pociągów, przede wszystkim jadących w kierunku punktu załadunkowego po wzniosie torowiska, można zastosować zmniejszony stopień wzbudzenia – do wartości 80%, ponieważ wraz ze wzrostem o prawie 7% prędkości składu wzrasta tylko o 1% zużycie energii elektrycznej na trasie transportowej, co przedstawia tabela 2. Jednakże podczas jazdy składu w kierunku punktu wyładunkowego prędkość składu pociągu wzrasta o ponad 6%, natomiast zużycie energii elektrycznej wzrasta już o 4%, co przedstawia tabela 3.

in coal mines, than for the locomotive mass of 14 Mg the maximum pulling force of the locomotive will amount to 27.5 kN. Since the pulling force of the locomotive decreases with the increase of speed, which is shown in figs. 2,3 and 4, for every analyzed level of propulsion engines excitation the maximum value of the current was limited, so that for the zero value the value of drive torque of engines allowed to exceed slightly the maximum value of pulling power of the locomotive referred to above. This brings about the fact that on dry railway line with the coefficient of friction between the locomotive wheels and rails amounting to assumed 0.2, the locomotive wheels are at the grip limit. In this way we will obtain the maximum value of drive torque of engines, which will allow starting the locomotive without losing the grip of wheels on dry railway lines.

In accordance with assumptions above, analyzing the data in the tables above, the best and sufficient level of excitation of propulsion engines is 100% excitation. Moreover, at this level of excitation of traction motors the consumption of electricity on the transport line is the lowest.

5. SUMMARY

As a result of performed analyses and computer simulations it may be stated that in case of application of trolley locomotives type Ld 31 powered by engines type LDa-327a to transport excavated material in methane-free seams of coal mines, the use of 100% level excitation of the propulsion engine is optimal in terms of electricity consumption.

Due to achieved speed of train's operation, mainly in the direction of the loading point on the uplift of the railway line, excitation level lowered to 80% may be applied, since with the increase of almost 7% of the train speed, the electricity consumption increases by only 1% on the transport line, which is presented in table 2. However, during the operation of the train in the direction of unloading point, the speed of the train increases by over 6%, but the electricity consumption is 4% higher, which is shown in table 3.

Application of even lower levels of traction motors excitation is not recommended due to increasing consumption of electricity on the transport line as well as due to increased current draw from electric traction, which is presented in tables 2 and 3.

Stosowanie jeszcze niższych stopni wzbudzenia silników trakcyjnych nie jest zalecane ze względu na wzrastające zużycie energii elektrycznej na trasie transportowej oraz na zwiększony pobór prądu z trakcji elektrycznej, co przedstawiają tabele 2. i 3.

Literatura

1. Budzyński Z., Deja P.: *Nowa generacja napędów trakcyjnych lokomotyw kopalnianych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2008, nr 79, s. 39-43.
2. *Silnik prądu stałego do trakcji dolowej typu LDa 280 i LDa 327a*, dokumentacja techniczno-ruchowa, Zakłady Wytwórcze Maszyn Elektrycznych i Transformatorów „EMIT” Żychlin.
3. Dzikowski A.: *Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2011, nr 3, s. 13-20.
4. Dzikowski A., Gąsior T., Budzyński Z.: *Porównanie parametrów trakcyjnych lokomotywy kopalnianej wyposażonej w różne typy napędu z silnikami prądu stałego i zmiennego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2011, nr 90, s. 157-162.
5. Dzikowski A., Hefczyc M., Kozłowski A.: *Energooszczędne napędy maszyn górniczych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zasilanymi z przemienników częstotliwości*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2013, nr 98, s. 23-31.
6. Strony internetowe firmy DESIM Sp. z o.o.: http://www.desim.pl/lokomotywy_gornicze_ee.html.
7. Strony internetowe firmy Energo-Mechanik Sp. z o.o.: http://www.energomechanik.pl/energomechanik/images/Oferta/07-ENERGOMECHANIK_REMONT-i-MODERNIZACJE.pdf.
8. Symulator układów energoelektronicznych PSIM: <http://www.powersimtech.com/download.html>.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.

References

1. Budzyński Z., Deja P.: *Nowa generacja napędów trakcyjnych lokomotyw kopalnianych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2008, nr 79, s. 39-43.
2. *Silnik prądu stałego do trakcji dolowej typu LDa 280 i LDa 327a*, dokumentacja techniczno-ruchowa, Zakłady Wytwórcze Maszyn Elektrycznych i Transformatorów „EMIT” Żychlin.
3. Dzikowski A.: *Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2011, nr 3, s. 13-20.
4. Dzikowski A., Gąsior T., Budzyński Z.: *Porównanie parametrów trakcyjnych lokomotywy kopalnianej wyposażonej w różne typy napędu z silnikami prądu stałego i zmiennego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2011, nr 90, s. 157-162.
5. Dzikowski A., Hefczyc M., Kozłowski A.: *Energooszczędne napędy maszyn górniczych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zasilanymi z przemienników częstotliwości*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2013, nr 98, s. 23-31.
6. Strony internetowe firmy DESIM Sp. z o.o.: http://www.desim.pl/lokomotywy_gornicze_ee.html.
7. Strony internetowe firmy Energo-Mechanik Sp. z o.o.: http://www.energomechanik.pl/energomechanik/images/Oferta/07-ENERGOMECHANIK_REMONT-i-MODERNIZACJE.pdf.
8. Symulator układów energoelektronicznych PSIM: <http://www.powersimtech.com/download.html>.

The article was reviewed by two independent reviewers.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РУДНИЧНОГО ЛОКОМОТИВА И ПОЕЗДНОГО СОСТАВА

Статья представляет влияние степени возбуждения приводного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением на тяговые характеристики шахтного электровоза и поездного состава. Изменение степени возбуждения приводного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением вызывает изменение формирования тягового момента с точки зрения приобретаемой скорости вращения и тока электродвигателя. Это оказывает определяющее влияние на получаемую величину ускорения и максимальную скорость локомотива и всего состава. Изменения характеристик скорости вращения и момента тягового двигателя вследствие изменения степени возбуждения позволяют подобрать тяговые параметры электровоза и поездного состава. Представленный в статье анализ результатов компьютерного моделирования позволяет сделать выводы относительно оптимального подбора степени возбуждения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в зависимости от ожидаемых тяговых параметров локомотива и состава поезда в сложных шахтных условиях.