

Zygmunt SZYMAŃSKI

WPŁYW ZMIAN PARAMETRÓW ZASILANIA NA DYNAMIKĘ UKŁADU NAPĘDOWEGO  
AKUMULATOROWEJ LOKOMOTYWY KOPALNIANEJ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono model matematyczny układu napędowego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej zasilanej z przerwacza tyrystorowego prądu stałego. Do analizy stanów dynamicznych lokomotywy przyjęto uproszczony model matematyczny silnika szeregowego prądu stałego. W przyjętym modelu silnika napędowego pominięto: przepływ oddziaływania twornika oraz wpływ prądów wirowych na strumień wzbudzenia, założono jednoznaczny charakterystykę magnesowania silnika, aproksymowaną funkcją:  $\Phi = A \cdot \arctg(B \cdot i_s)$ . Ponadto założono: sztywne połączenie wału silnika z zestawem kołowym oraz liniową zmienność napięcia baterii akumulatorów od prądu obciążenia. Przyjęte założenia upraszczające w niewielkim stopniu wpływają na dokładność obliczeń numerycznych. Analizę wpływu zmian parametrów zasilania na dynamikę układu napędowego lokomotywy kopalnianej przeprowadzono metodą symulacji numerycznej. Obliczenia wykonano dla dwóch typów lokomotyw akumulatorowych: Lea BM5 i LEA BM12. W obliczeniach uwzględniono różne stany pracy lokomotyw: rozruch lokomotywy Lea BM5 za pomocą nastawnika CNLD, hamowanie ze zwrotem energii do baterii akumulatorów oraz odpowiedź układu napędowego na skokową zmianę momentu obciążenia. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach (3-6). Z przedstawionych wykresów wynika, że czas rozruchu silnika napędowego lokomotywy nie zależy praktycznie od stopnia rozładowania baterii akumulatorów.

## 1. WSTĘP

Rozwiązanie szeregu problemów wiążących się z eksploatacją szynowych pojazdów trakcyjnych wymaga stosowania symulacji cyfrowej pracy silników trakcyjnych pojazdu w stanach dynamicznych. Wynika to z faktu, że czas pracy ustalonej silników (czyli ruch pojazdu ze stałą prędkością) stanowi niewielką część całkowitego czasu jazdy. Symulacja cyfrowa ruchu pojazdu umożliwia m.in.: badanie stanów przejściowych przy przełączaniu sekcji baterii akumulatorów lub silników, analizę stanów awaryjnych układu napędowego lokomotywy oraz badanie wpływu zmian parametrów baterii akumulatorów na rozruch i hamowanie lokomotywy.

Lokomotywy akumulatorowe stosowano początkowo do przewozu pomocniczego w metanowych wyrobiskach przodkowych. Obecnie stosowane są również do przewozu głównego, szczególnie w wyrobiskach silnie gazowych. W [1] podano wykaz typów i parametrów technicznych akumulatorowych lokomotyw stosowanych w polskim górnictwie. W artykule ograniczono analizę do dwóch

typów lokomotyw produkowanych przez "Konstal" Chorzów: Lea BM5 oraz Lea BM12.

W tabeli 1 podano niektóre parametry techniczne tych dwóch typów lokomotyw [2, 3].

Tabela 1

	Lea BM5	Lea BM12
Masa użyteczna (kg)	5.10 <sup>3</sup>	12.10 <sup>3</sup>
Siła pociągowa przy mocy godzinnej (kN)	7	16,8
Prędkość godzinowa (m/sek.)	1,7	2,2
Prędkość max. (m/sek.)	3,4	4,4
Moc godzinowa (kW)	5,5	38
Liczba silników	2	1
Typ silnika	LDS-05a	LDe245
Napięcie baterii akumulatorów (V)	84	144
Pojemność baterii akumulatorów (A.h)	420	760

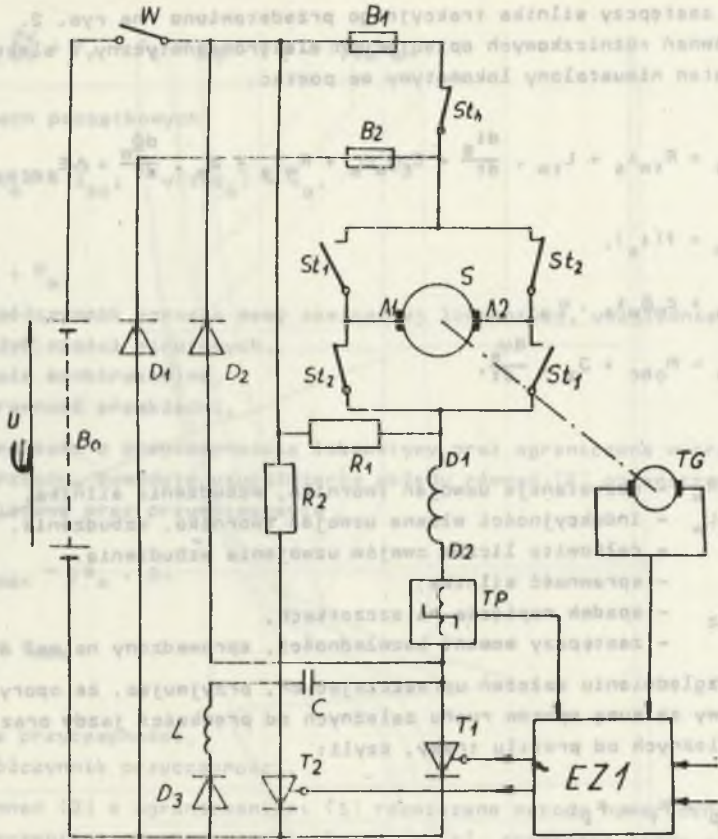
Szczegółowy opis wyposażenia elektrycznego oraz układu przenoszenia napędu akumulatorowych lokomotyw typu: Lea BM5 oraz Lea BM12 przedstawiono w [2, 3]. Na rys. 1 pokazano schemat ideowy obwodu głównego lokomotywy Lea BM12 zasilanej z przerywacza tyrystorowego prądu stałego.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY AKUMULATOROWEJ DLA PRACY BEZPOŚLIZGOWEJ

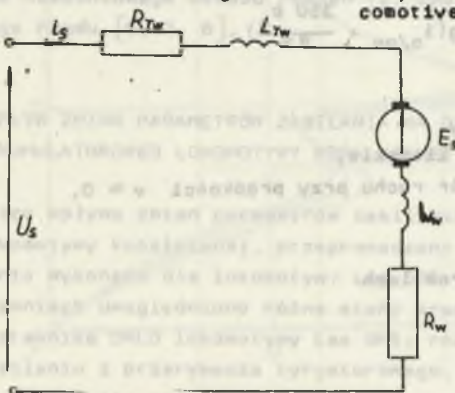
Układ napędowy lokomotywy jest odpowiednią, uzależnioną od typu oraz konstrukcji pojazdu, konfiguracją połączeń silników trakcyjnych, przyłączonych w odpowiedni sposób do baterii akumulatorów. Model matematyczny silnika szeregowego zasilanego z przerywacza tyrystorowego prądu stałego podano w [4, 5]. W artykule przyjęto uproszczony model matematyczny silnika, przy czym przyjęte uproszczenia wpływają w niewielkim stopniu na dokładność obliczeń numerycznych.

Założenia upraszczające:

- pominięto wpływ przepływu oddziaływania twornika na strumień wzbudzenia,
- pominięto wpływ prądów wirowych na strumień wzbudzenia,
- założono sztywne połączenie wału silnika z zestawem kołowym,
- założono jednoznaczność charakterystykę magnesowania silnika, aproksymowaną funkcją:  $\Phi = A \arctg(\psi \cdot i_s)$ .



Rys. 1. Schemat ideowy obwodu głównego lokomotywy akumulatorowej Lea EM12  
 Fig. 2. Schematic diagram of main system, of storage - battery mining locomotive



Rys. 2. Schemat zastępczy silnika trakcyjnego

Fig. 2. Equivalent circuit of traction motors

- przyjęto stałą wartość sprawności silnika oraz przekładni,
- pominięto w analizie indukcyjność uzwojenia twornika silnika,
- założono liniową zmienność napięcia baterii akumulatorów od prądu obciążenia,
- przyjęto liniową zależność oporów ruchu pojazdu od prędkości jazdy,
- symetrię rozkładu ciężaru lokomotywy na poszczególne koła.

Schemat zastępczy silnika trakcyjnego przedstawiono na rys. 2. Układ równań różniczkowych opisujących elektromagnetyczny i elektromechaniczny stan nieustalony lokomotywy ma postać:

$$U_s = R_{tw} i_s + L_{tw} \cdot \frac{di_s}{dt} + C_E \Phi_w \omega_s + R_w i_s + z_w \cdot \frac{d\Phi_w}{dt} + \Delta E_{szcz}; \quad \text{Tabela 1}$$

$$\Phi_w = f(i_s),$$

$$M_s = c_M \Phi_w i_s \cdot \eta_s,$$

$$M_s - M_{obc} = J_z \cdot \frac{d\omega_s}{dt},$$

gdzie:

- $R_{tw}, R_w$  - rezystancje uzwojeń twornika, wzbudzenia silnika,
- $L_{tw}, L_w$  - indukcyjności własne uzwojeń twornika, wzbudzenia,
- $z_w$  - całkowita liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia,
- $\eta_s$  - sprawność silnika,
- $\Delta E_{szcz}$  - spadek napięcia na szczotkach,
- $J_z$  - zastępczy moment bezwładności, sprowadzony na wał silnika.

Po uwzględnieniu założeń upraszczających, przyjmując, że opory ruchu lokomotywy są sumą oporów ruchu zależnych od prędkości jazdy oraz oporów ruchu zależnych od profilu trasy, czyli:

$$F_{op} = F_r + F_l;$$

przy czym:

$$F_r = m_1 g (r_o + a_o v); \quad F_l = m_1 g \left( i_{o/oo} + \frac{350 p}{R_r} \right),$$

gdzie:

- $m_1$  - masa lokomotywy,
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  - przyspieszenie ziemskie,
- $r_o$  - jednostkowy opór ruchu przy prędkości  $v \approx 0$ ,
- $R_r$  - promień łuku,
- $p_s$  - prześwit toru,
- $i_{o/oo}$  - upad trasy w promilach

otrzymujemy układ równań (2):

$$U_s = z_w \frac{d\Phi_w}{di_s} \cdot \frac{di_s}{dt} + R_t i_s + c_r \Phi_w \cdot v + \Delta E_{szcz} \quad (2)$$

$$m_1 k_{pz} \frac{dv}{dt} + F_r + F_l = \eta_s \cdot \eta_z \cdot c_r \Phi_w i_s, \quad (2)$$

przy warunkach początkowych:

$$i_s(t=t_0) = i_{s0}; \quad v(t=t_0) = v_0,$$

gdzie:

$$R_t = R_{tw} + R_w;$$

$k_{pz}$  - współczynnik wzrostu masy zastępczej lokomotywy, uwzględniający wpływ części wirujących,

$c_r$  - stała konstrukcyjna,

$\eta_z$  - sprawność przekładni.

Wymagania związane z przyczepnością lokomotywy oraz ograniczoną wytrzymałością sprzęgów, powodują uzupełnienie układu równań (2) ograniczeniami na siłę pociągową oraz przyspieszenie

$$F \leq F_{max} = \varphi m_a \cdot g,$$

$$\left| \frac{dv}{dt} \right| \leq a_{max}, \quad (3)$$

gdzie:

$m_a$  - masa przyczepności,

$\varphi$  - współczynnik przyczepności.

Układ równań (2) z ograniczeniami (3) rozwiązano metodą numeryczną, otrzymując przebiegi czasowe prądu silnika  $i_s(t)$ , prędkości jazdy  $v(t)$  oraz siły pociągowej  $F(t)$  dla różnych stanów pracy lokomotywy. Do rozwiązania nieliniowego układu równań (2) zastosowano metodę Rungego-Kutty czwartego rzędu [6, 7, 8].

### 3. WPŁYW ZMIAN PARAMETRÓW ZASILANIA NA DYNAMIKĘ UKŁADU NAPĘDOWEGO AKUMULATOROWEJ LOKOMOTYWY KOPALNIANEJ

Analizę wpływu zmian parametrów zasilania na dynamikę układu napędowego lokomotywy kopalnianej, przeprowadzono metodą symulacji numerycznej. Obliczenia wykonano dla lokomotyw: Lea BM5 i Lea BM12.

W obliczeniach uwzględniono różne stany pracy lokomotywy: rozruch za pomocą nastawnika ONLD lokomotywy Lea BM5; rozruch lokomotywy Lea BM12 przy zasilaniu z przerywacza tyrystorowego, samowzbudzenie silnika trakcyjnego, hamowanie ze zwrotem energii do baterii akumulatorów, oraz odpowiedź układu napędowego lokomotywy na skokową zmianę momentu obciążenia.

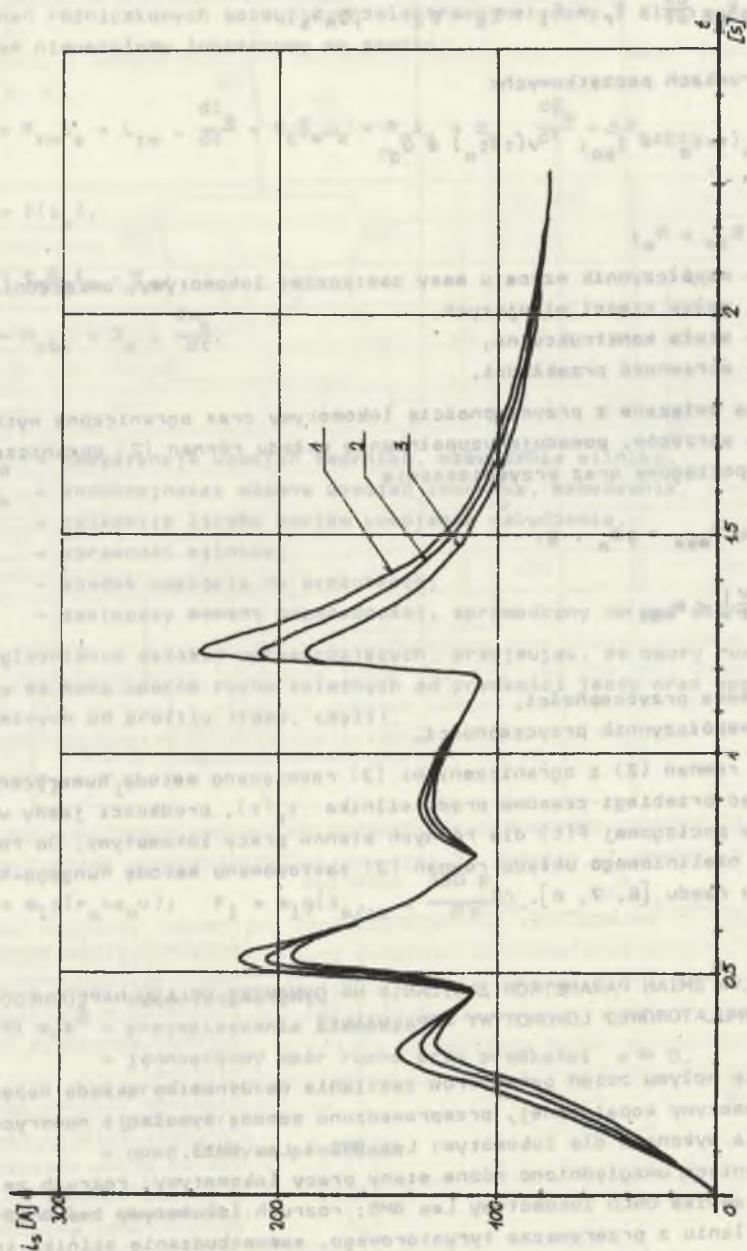
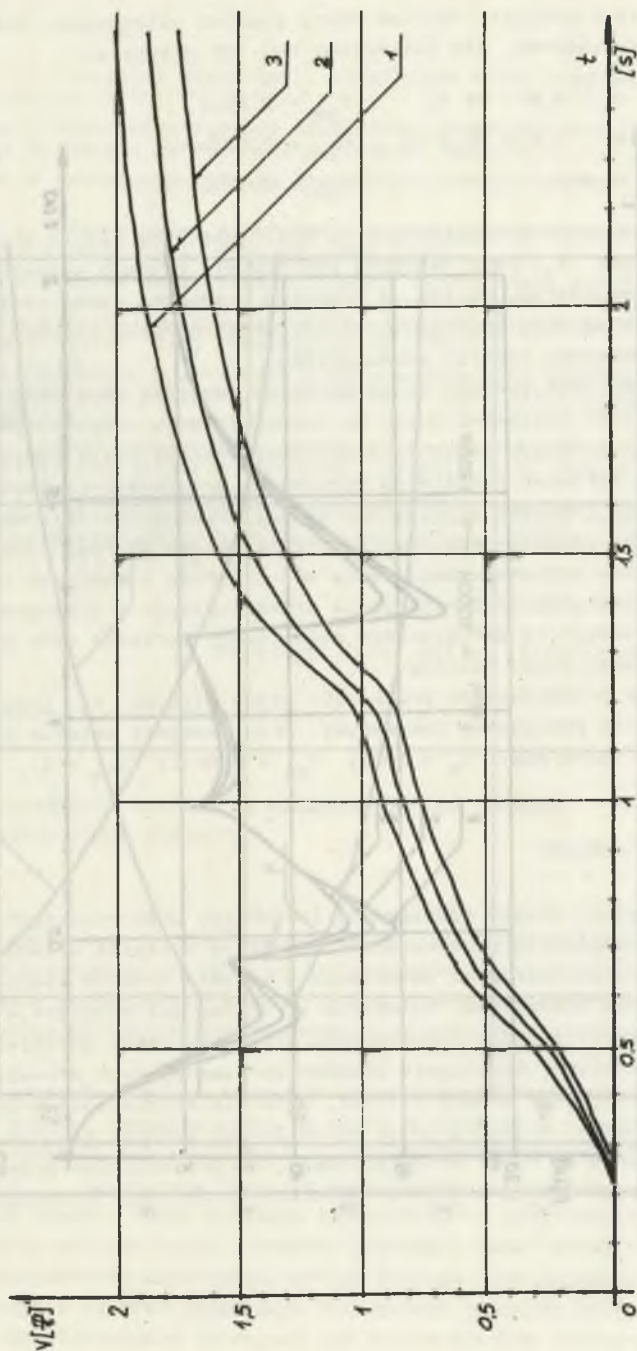
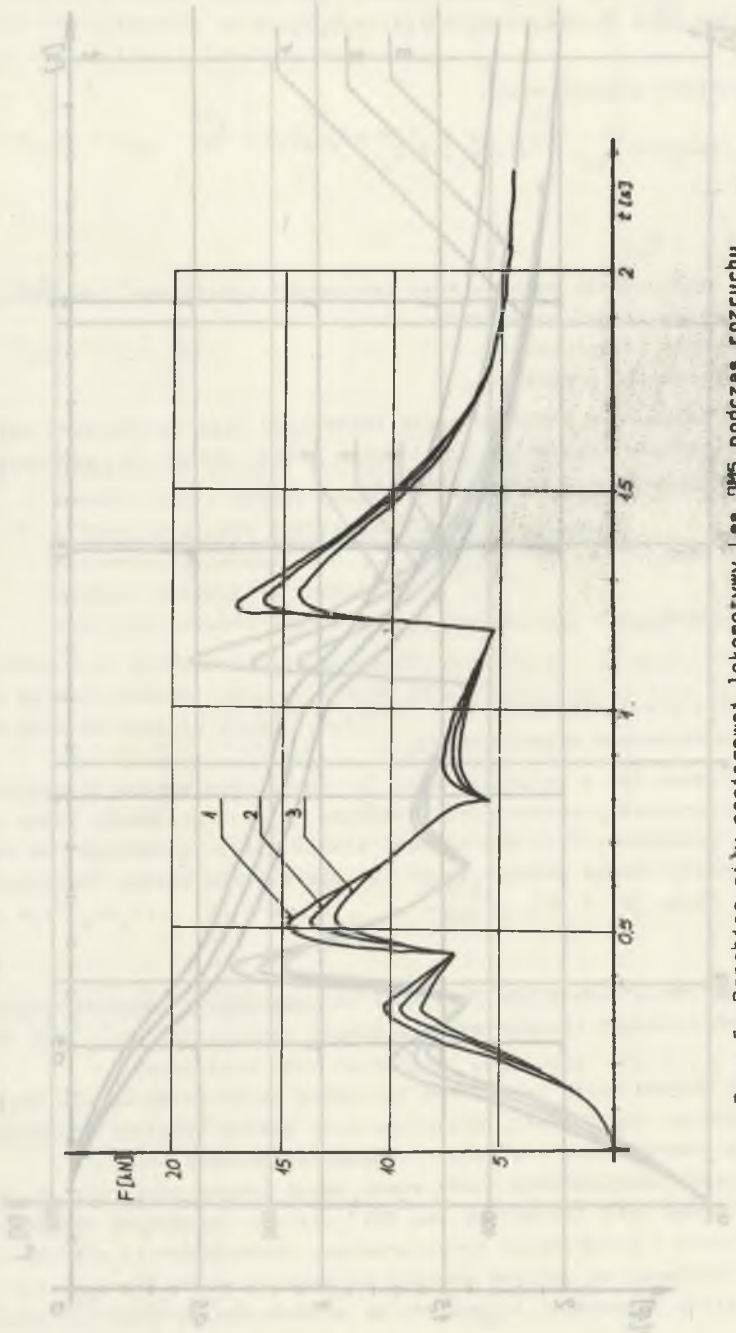


Рис. 3. Przebieg prądu silnika przy rozruchu lokomotywy Lee BM5  
 Fig. 3. Time rining of current motor for starting up of a locomotive Lee BM5

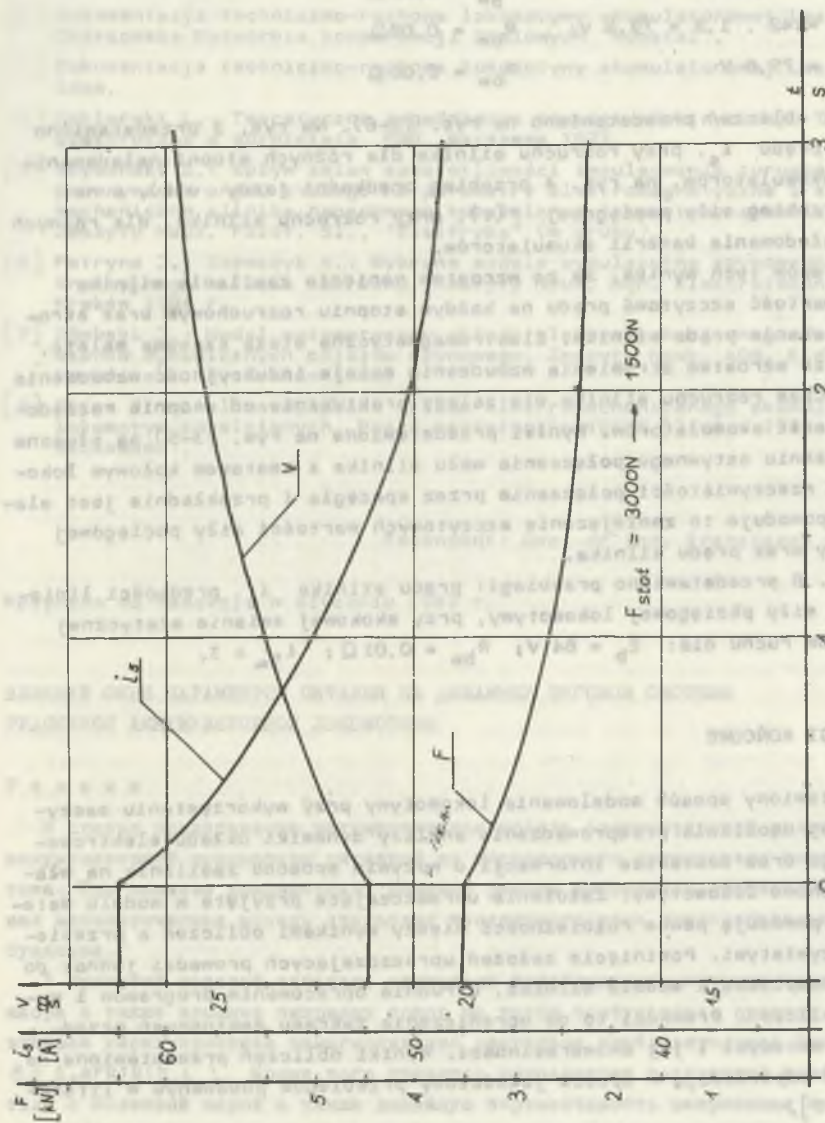


Rys. 4. Przebieg prędkości liniowej lokomotywy Lea BM5 podczas rozruchu  
 Fig. 4. Time course of linear speed for starting up of a locomotive Lea BM5



Rys. 5. Przebieg siły pociągowej lokomotywy Lea 0M5 podczas rozruchu  
 Fig. 5. Time running of tractive effort for starting up of a locomotive Lea 0M5





Rys. 6. Przebieg prądu silnika, prędkości liniowej i siły pociągowej lokomotywy, przy skokowej zmianie siły oporów ruchu

Fig. 6. Time running of current, tractive effort and linear speed for stepping changes of total resistance force

W obliczeniach przyjęto również różny stopień naładowania baterii akumulatorów. Przykładowo, dla lokomotywy Lea 3M5 przyjęto:

- |   |                        |
|---|------------------------|
| 1) $E_b = 42 \cdot 2,0 = 84 \text{ V};$   | $R_{bw} = 0,01 \Omega$ |
| 2) $E_b = 42 \cdot 1,9 = 79,8 \text{ V};$ | $R_{bw} = 0,02 \Omega$ |
| 3) $E_b = 79,8 \text{ V}$                 | $R_{bw} = 0,06 \Omega$ |

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. (3-6). Na rys. 3 przedstawiono przebieg prądu  $i_g$ , przy rozruchu silnika dla różnych stopni naładowania baterii akumulatorów, na rys. 4 przebieg prędkości jazdy  $v(t)$ , a na rys. 5 przebieg siły pociągowej  $F(t)$ , przy rozruchu silnika, dla różnych stopni naładowania baterii akumulatorów.

Z wykresów tych wynika, że ze wzrostem napięcia zasilania silnika wzrasta wartość szczytowa prądu na każdym stopniu rozruchowym oraz stromość narastania prądu silnika. Elektromagnetyczna stała czasowa maleje, ponieważ ze wzrostem strumienia wzbudzenia maleje indukcyjność wzbudzenia silnika. Czas rozruchu silnika nie zależy praktycznie od stopnia rozładowania baterii akumulatorów. Wyniki przedstawione na rys. (3-5) są słuszne przy założeniu sztywnego połączenia wału silnika z zestawem kołowym lokomotywy. W rzeczywistości połączenie przez sprzęgła i przekładnie jest elastyczne, powoduje to zmniejszenie szczytowych wartości siły pociągowej lokomotywy oraz prądu silnika.

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi: prądu silnika  $i_g$ , prędkości liniowej  $v$  i siły pociągowej lokomotywy, przy skokowej zmianie statycznej siły oporów ruchu dla:  $E_b = 84 \text{ V}; R_{bw} = 0,01 \Omega; 1/\omega = 3$ .

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony sposób modelowania lokomotywy przy wykorzystaniu maszyny cyfrowej umożliwia przeprowadzenie analizy dynamiki układu elektromechanicznego oraz dostarcza informacji o wpływie sposobu zasilania na własności ruchowe lokomotywy. Założenia upraszczające przyjęte w modelu matematycznym powodują pewne rozbieżności między wynikami obliczeń a przebiegami rzeczywistymi. Pominięcie założeń upraszczających prowadzi jednak do znacznej komplikacji modelu silnika, utrudnia opracowanie programów i wykonanie obliczeń. Prowadzi to do ograniczenia zakresu zastosowań przedstawionej metodyki i jej uniwersalności. Wyniki obliczeń przedstawione na rys. (3-6) odpowiadają w sposób jakościowy przebiegom podawanym w literaturze [6, 7].

## LITERATURA

- [1] Antoniuk J.: Transport kopalniany. Kopalniana kolej podziemna. Skrypt Nr 517, Gliwice 1974.
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa lokomotywy akumulatorowej Lea BM5. Chorzowska Wytwornia konstrukcji Stalowych "Konstal".
- [3] Dokumentacja techniczno-ruchowa lokomotywy akumulatorowej Lea BM12 idem.
- [4] Szklarski L.: Teoretyczne zagadnienia trakcji elektrycznej. Trakcja elektryczna w górnictwie, PWN, Warszawa 1972.
- [5] Szymański Z.: Wpływ zmian częstotliwości impulsowania tyrystorowego przerywacza prądu stałego na parametry elektromagnetyczne i elektromechaniczne silnika napędowego kopalnianej lokomotywy akumulatorowej. Zeszyty Nauk. Polit. Śl., "Elektryka" (w druku).
- [6] Petryna J., Szewczyk A.: Wybrane modele symulacyjne szynowego pojazdu trakcyjnego w fazie rozruchu. Zeszyty Nauk. AGH. Elektrotechnika z. 3, Kraków 1984 r.
- [7] Zdebski J.: Model matematyczny układu elektromechanicznego do analizy stanów dynamicznych pojazdu szynowego. Zeszyty Nauk. AGH. Elektrotechnika z. 4, Kraków 1984.
- [8] Zajęc J.: Analiza dynamiki układu elektromechanicznego akumulatorowych lokomotyw kopalnianych. Praca magisterska IElAG Gliwice 1986 (niepublikowana).

Recenzernt: Doc. dr inż. Franciszek SZCZUCKI

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1987 r.

ВЛИЯНИЕ СМЕН ПАРАМЕТРОВ ПИТАНИЯ НА ДИНАМИКУ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ  
РУДНИЧНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ ЛОКОМОТИВЫ

Р е з ю м е

В статье представлена математическая модель электротяговой рудничной аккумуляторной локомотивы питаемой из тиристорного прерывателя постоянного тока. При анализе динамических режимов работы локомотивы принята упрощенная математическая модель двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

В принятой модели тягового двигателя несоблюдено: течение создаваемого якоря а также влияние вихревых токов на поток возбуждения, принята одназначная характеристика намагничивания двигателя приближительная функцией  $\Phi = A \cdot \arctg(B \cdot I_a)$ . Кроме того принято: неподвижное соединение вала двигателя с колесной парой а также линейную переменчивость напряжения аккумуляторной батареи от тока нагрузки. Принятые упрощения имеют небольшое влияние на точность нумерических вычислений. Анализ влияния смен параметров питания на динамику тяговой системы рудничного электровоза проведен методом нумерических симуляции. Вычисления проведены для аккумуляторных электровозов типа

Lea BM5 и Lea BM12. В вычислениях были учитываны разные режимы работы электровозов: пуск электровоза Lea BM5 при помощи барабаниного группового переключателя ONDL, торможение при отдаче энергии к аккумуляторной батарее а также ответ тяговой системы на шаговую смену момента нагрузки. Отчёты вычислений представлены на диаграммах (3-6). Из представленных диаграмм нужно следовать, что время пуска тягового двигателя электровоза практически не зависит от степени разгрузки аккумуляторной батареи.

THE INFLUENCE OF SUPPLY PARAMETERS OF CHANGES ON DYNAMICS OF A DRIVING SYSTEM OF A STORAGE - BATTERY MINING LOCOMOTIVE

S u m m a r y

The article presents mathematical model of a driving system of a storage - battery mining locomotive supplied from DC thyristor chopper.

For the analysis of dynamic properties of a locomotive was accepted a simple mathematical model of DC series motor. In the model of a driving motor have been omitted: armature influence flux and influence of eddy - current for exciting flux, assumed also univocal magnetizing characteristic of the motor, which was approximated by function:  $\Phi = A \arctg(B \cdot i)$ . Moreover it was assumed: rigid coup of motor shaft with the bogie, and linear voltage variability of storage - battery with loading current. Above simplification in a little degree influence the accuracy of numerical calculations. The influence of supply parameter of changes on dynamics of a driving system of a storage - battery mining locomotive were analysed by the numerical simulation method. The calculation have been performed for two type storage - battery locomotive: Lea BM12 i Lea BM5. In calculations different run conditions of locomotive have been considered: starting up of a locomotive Lea BM5 using the controller ONDL, electric regenerative braking, and response of a driving system for step change of loading torque. The results of calculations are presented in fig. (3-6). From presented diagrams it can be concluded, that starting time of the driving motor locomotive is practically independent on discharging degree of storage - battery.