

ELEKTROMECHANICZNY MODEL LOKOMOTYWY EU07

SŁAWOMIR DUDA

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: sduda@polsl.pl

Streszczenie. W pracy opisano modelowanie układów elektromechanicznych, na podstawie lokomotywy elektrycznej napędzanej poprzez zestawy kołowe szeregowymi silnikami prądu stałego. Sformułowano model matematyczny zespołu elektromagnetycznego silników prądu stałego. Opracowany model matematyczny silnika elektrycznego umożliwia uwzględnienie rzeczywistych wartości rezystancji dodatkowych w obwodzie tworników i w obwodzie wzbudzeń, co pozwala oddać rzeczywiste nastawy podczas rozruchu pojazdu trakcyjnego. Jako metodę modelowania części mechanicznej pojazdu zastosowano metodologię opartą na układach wieloczłonowych. Sformułowany model matematyczny silnika zaimplementowano w programie Matlab/Simulink i sprzężono go z modelem pojazdu opracowanym w programie Simmechanics. Modele te umożliwiają wyznaczenie momentu trakcyjnego przy różnych stanach dynamicznych pojazdu (rozruch, praca ustalona) w zależności od obciążenia lokomotywy.

1. WSTĘP

Metody numeryczne rozwijane od wielu lat pozwalają na dokładniejszy opis złożonych zjawisk występujących podczas eksploatacji maszyn. Opracowane modele stają się cennym narzędziem przy projektowaniu pojazdów, mechanizmów czy konstrukcji nośnych.

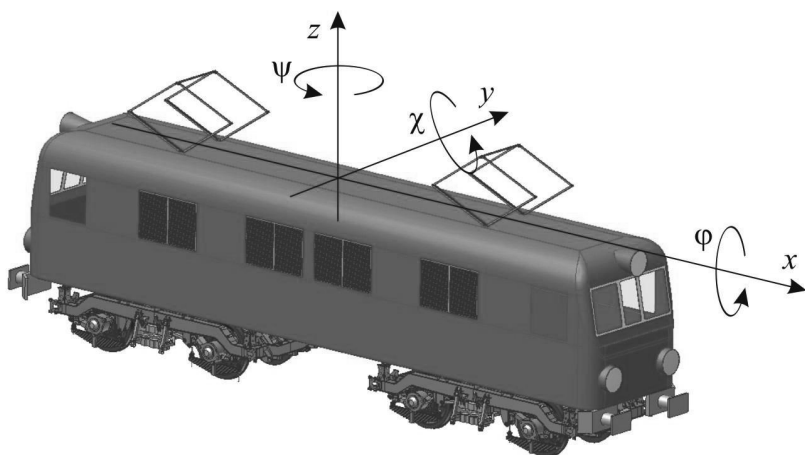
Modelowanie dynamiki układów napędowych jest szczególnie istotne w celu otrzymania informacji dotyczących zachodzących w nim zjawisk w stanach nieustalonych, takich jak rozruch czy hamowanie [6]. Charakter przebiegów czasowych wielkości dynamicznych zależy w znacznej mierze od własności silnika napędzającego maszynę. Analizy wpływu silnika elektrycznego na układ mechaniczny można dokonać, modelując układ napędowy jako układ elektromechaniczny. Zjawiska dynamiczne w silnikach elektrycznych stanowią źródło generowania drgań w elektromechanicznych układach napędowych. Charakter przebiegów czasowych wielkości dynamicznych zależy w znacznej mierze od własności silnika napędzającego maszynę [4].

Wykorzystanie badań modelowych stosowane jest zarówno w poszukiwaniu nowych rozwiązań w transporcie jak i w dotychczas eksploatowanych pojazdach. Wymagania związane ze zwiększeniem prędkości jazdy, polepszeniem komfortu, przewozem ładunku o większym tonażu dotyczą nie tylko nowo projektowanych, ale również już istniejących pojazdów. Wraz z powyższymi wymaganiami należy zweryfikować wartości sił powstających w wyniku współpracy koło – szyna, co jest związane z utrzymaniem stabilności pojazdu w nowych warunkach pracy. Przy obliczeniach nie wystarczają już modele sił kontaktowych

z dużym stopniem uproszczenia. Złożoność zjawisk fizycznych towarzyszących kontaktowi koło – szyna powoduje potrzebę skomplikowanych modeli kontaktu, gdyż siły generowane na styku tych elementów silnie wpływają na zachowanie dynamiczne całego pojazdu szynowego. Również charakterystyka zawieszenia pojazdu, masy elementów, geometria i nierówność toru odgrywają w tym przypadku zasadniczą rolę. Rozpatrzenie wszystkich tych zjawisk wymaga zastosowania w badaniach zaawansowanych technik komputerowych skoncentrowanych na opracowaniu realistycznego modelu pojazdu szynowego oraz dokładnej charakterystyki zjawisk kontaktowych koło-szyna.

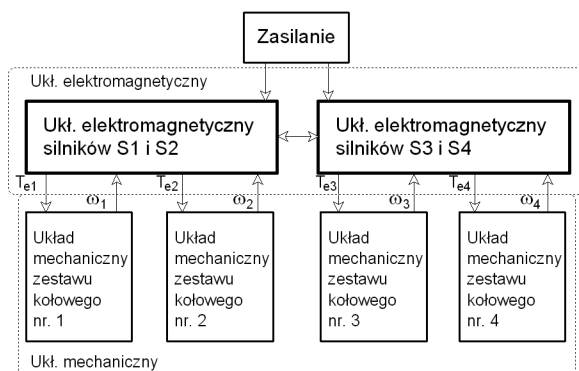
2. MODEL ELEKTROMECHANICZNY POJAZDU SZYNOWEGO

W badaniu dynamiki pojazdów szynowych rozpatrywanie ruchu całego pojazdu jak i jego podstawowych elementów jest bardzo istotne dla jakości prowadzonej analizy. Umożliwia to wyznaczenie parametrów kinematycznych tych części oraz sił wzajemnego oddziaływania. W celu przeprowadzenia badań oddziaływań dynamicznych, jakie powstają na styku pojazdu z torem, wyznaczenia momentu trakcyjnego, jaki zostaje przeniesiony przez koła jezdne, do celów analizy pojazdu szynowego wybrano lokomotywę elektryczną o symbolu EU07 (rys. 1). Pomimo świadomości, że jest to „wiekowy” model lokomotywy, wybrano właśnie ją z powodu łatwego dostępu do dokumentacji konstrukcyjnej umożliwiającej odtworzenie w przestrzeni wirtualnej zasadniczych cech pojazdu jak i określenie parametrów silników elektrycznych.



Rys. 1. Model pojazdu wykonany w programie Inventor

W układzie napędowym elektrowozu EU07 można wyróżnić trzy podstawowe podzespoły, tj. układ zasilania, elektromagnetyczny i mechaniczny, które są wzajemnie ze sobą sprzężone. Układ elektromagnetyczny zbudowany jest z obwodów rezystorów rozruchowych i bocznikujących, obwodów tworników i wzbudzeń silników szeregowych prądu stałego. Układ mechaniczny złożony jest z wirników silników, przekładni ruchu i zestawów kołowych. Taką strukturę układu napędowego elektrowozu przedstawiono na rys. 2.

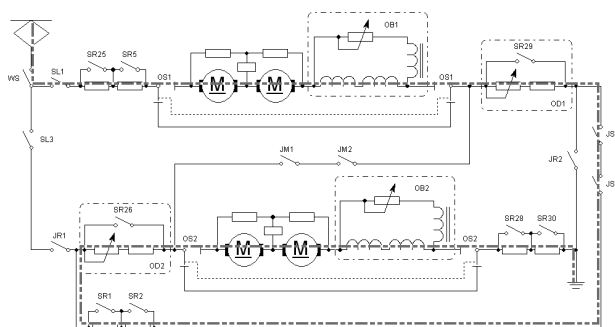


Rys. 2. Blokowa struktura układu napędowego elektrowozu

Układy elektromagnetyczny i mechaniczny sprzęgają się wzajemnie poprzez moment elektromagnetyczny i prędkość kątową wirnika. Ze względu na powyższą strukturę układu napędowego analiza stanów dynamicznych układu musi uwzględnić analizę dynamiki układu elektromagnetycznego i mechanicznego. Dlatego też w dalszej części przedstawiony zostanie model układu elektromagnetycznego oraz mechanicznego.

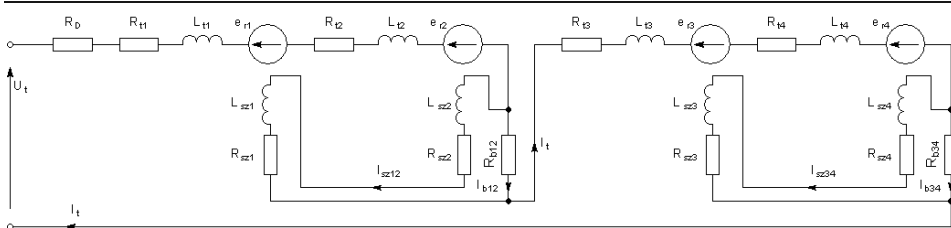
2.1. Model matematyczny silników

W cyklu pracy silniki trakcyjne lokomotywy EU07 pracują w dwóch konfiguracjach. Podczas rozruchu cztery silniki połączone są w szereg, a następnie w celu zwiększenia napięcia silniki przełączane są w obwód równoległy, po dwa silniki w gałęzi. Rozważano połączenie szeregowe silników trakcyjnych lokomotywy. Schemat ideowy tego wariantu wraz z zaznaczonym przepływem prądu (przy pełnym wzbudzeniu silników) przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Główny kierunek przepływu prądu (linia pogrubiona przerywana) przy połączeniu szeregowym silników – dla programu załączeń styczników 0÷27

Na podstawie rys. 3. opracowano schemat zastępczy obwodów tworników z rezystorem dodatkowym oraz układów wzbudzenia z rezystorami bocznikującymi silników trakcyjnych połączonych szeregowo, który przedstawiony jest na rys. 4.



Rys. 4. Przyjęty schemat zastępczy obwodów elektrycznych silników połączonych szeregowo – dla programu załączeń styczników 0÷27

Na podstawie przedstawionego schematu i pracy [2] sformułowano model matematyczny podkładu elektromagnetycznego silników trakcyjnych połączonych szeregowo, który przybiera postać układu równań różniczkowych:

$$\frac{d}{dt} I_t = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 L_{ti}} \left(U_t - \sum_{i=1}^4 e_{ri} - I_t \left(\sum_{i=1}^4 R_{ti} + R_D \right) - R_{b12} (I_t - I_{sz12}) - R_{b34} (I_t - I_{sz34}) \right) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} I_{sz12} = \frac{1}{\sum_{i=1}^2 L_{szi}} \left(R_{b12} (I_t - I_{sz12}) - I_{sz12} \sum_{i=1}^2 R_{szi} \right) \quad (2)$$

$$e_{r1} = k_{E1} f(I_{sz12}) \phi_{n1} \omega_1; \quad e_{r2} = k_{E2} f(I_{sz12}) \phi_{n2} \omega_2 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} I_{sz34} = \frac{1}{\sum_{i=3}^4 L_{szi}} \left(R_{b34} (I_t - I_{sz34}) - I_{sz34} \sum_{i=3}^4 R_{szi} \right) \quad (4)$$

$$e_{r3} = k_{E3} f(I_{sz34}) \phi_{n3} \omega_3; \quad e_{r4} = k_{E4} f(I_{sz34}) \phi_{n4} \omega_4 \quad (5)$$

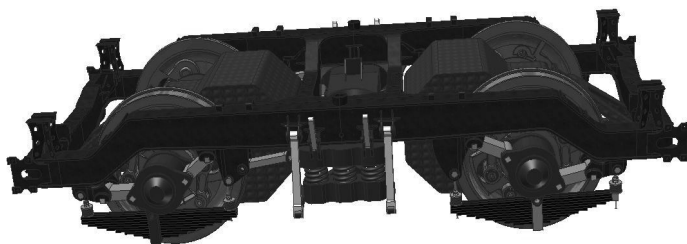
$$T_{e1} = I_t k_{E1} f(I_{sz12}) \phi_{n1}; \quad T_{e2} = I_t k_{E2} f(I_{sz12}) \phi_{n2}; \quad (6)$$

$$T_{e3} = I_t k_{E3} f(I_{sz34}) \phi_{n3}; \quad T_{e4} = I_t k_{E4} f(I_{sz34}) \phi_{n4}; \quad (7)$$

gdzie: I_t – prąd tworników silników trakcyjnych, I_{sz12} , I_{sz34} – prądy płynące przez uzwojenia wzbudzenia silników S1, S2 i S3, S4, k_{Ei} – stałe konstrukcyjne maszyny, ϕ_{ni} – strumienie przy wzbudzeniu nominalnym, $f(I_{szi})$ – względne nieliniowe charakterystyki magnesowania, R_{ti} – rezystancje tworników, R_{b12} , R_{b34} – rezystancje bocznikujące uzwojenia wzbudzenia, R_{szi} – rezystancje uzwojenia szeregowego, R_D – suma rezystancji dodatkowych, L_{szi} , L_t – indukcyjności uzwojeń wzbudzenia, ω_i – prędkości kątowe wirników, T_{ei} – momenty elektromagnetyczne silników, e_{ri} – napięcia indukowane w obwodach tworników.

2.2. Model obliczeniowy pojazdu

Potrzeba znacznej dokładności uzyskanych rozwiązań, przyjaznego interfejsu użytkownika i mocnych narzędzi obliczeniowych powoduje stały postęp zaawansowanych technologii obliczeniowych. Układy mechaniczne wymagają opisu ruchu elementów, nierzadko realizujących duże przemieszczenia, z uwzględnieniem złożonego współdziałania z otaczającym środowiskiem. Zastosowanie formalizmu w układach wieloczłonowych rozumianych jako układy wielu ciał połączonych poprzez różne typy par kinematycznych i działających nań sił wewnętrznych lub zewnętrznych umożliwia badanie zjawisk dynamicznych w nich występujących. Dotychczas powstało wiele programów komputerowych służących rozwiązywaniu tego typu zagadnień. Większość z nich to programy, które pozwalają uzyskiwać i rozwiązywać dynamiczne równania ruchu na podstawie obliczeń symbolicznych bądź programy wykonujące obliczenia numeryczne na podstawie modeli 3D- CAD. Istnieją też inne programy o bardziej ogólnym zastosowaniu jak na przykład środowiska oparte na diagramach blokowych. Do grupy tych ostatnich zalicza się środowisko Simulink/Simmechanics działające w programie MATLAB. Simmechanics jest programem komputerowym, w którym zaimplementowano teorię układów wieloczłonowych dla brył sztywnych. Układy mechaniczne są w nim przedstawione za pomocą połączonych diagramów blokowych. Wspomniane bloki Simechanics nie odwzorowują bezpośrednio funkcji matematycznych, ale mają określone znaczenie fizyczne. Modele uzyskiwane w tym programie składają się z bloków ciał, połączeń pomiędzy nimi w formie par kinematycznych i elementów sprężysto - tłumiących, sensorów, aktuatorów.



Rys. 5. Model CAD wózka

Na podstawie analizy układu rzeczywistego opracowano po dokonaniu niezbędnych uproszczeń przestrzenny model (rys. 1) odzwierciedlający podstawowe cechy pojazdu szynowego EU 07, złożony z budy pojazdu oraz dwóch modeli wózków (rys. 5). Model CAD utworzony w programie Autodesk Inventor posłużył do wyznaczenia parametrów masowych jak i miejsc zaczepienia elementów sprężystych bądź sprzęgających (par kinematycznych) poszczególne elementy pojazdu. Sztywności elementów sprężystych otrzymano na podstawie danych zawartych w dokumentacji technicznej. Model fizyczny zaimplementowano w programie Matlab /Simmechanics otrzymując model opisany w formalizmie układów wieloczłonowych, natomiast algorytm wyznaczający siły powstające na styku koło – szyna napisano w skrypcie programu Matlab [1]. Plik ten wykorzystuje w każdym kroku całkowania rozwiązanie pochodzące z modelu pojazdu opracowanego w Simmechanics (położenia, prędkości, macierze transformacji określające położenie układów lokalnych związanych z poszczególnymi bryłami modelu) w celu obliczenia sił kontaktowych. Siły te odpowiadają za podparcie i odpowiednie prowadzenie pojazdu oraz stanowią wraz z pozostałymi siłami: ciężkości, odśrodkowymi, bezwładności, siły zewnętrzne oddziaływające na model.

Program komputerowy zastosowany do wyznaczania sił kontaktowych, wymaganych w trakcie prowadzenia analizy dynamiki ruchu pojazdu szynowego po torze, realizuje algorytm przedstawiony szerzej w publikacji [3], który zawiera:

a) przyjęcie warunków początkowych dla współrzędnych położenia $\mathbf{q}(t^0)$ i prędkości $\dot{\mathbf{q}}(t^0)$ oraz określenie początkowych wartości parametrów powierzchni $s_r(t^0)$, $u_r(t^0)$, $s_w(t^0)$ i $u_w(t^0)$ związanych z poszczególną parą koło – szyna;

b) rozwiązanie układu równań nieliniowych w celu otrzymania parametrów powierzchni, które określają współrzędne punktów kontaktu związanych z każdą parą koło – szyna;

c) obliczenie sił normalnych w kontakcie, które powstają poprzez wzajemne oddziaływanie na siebie koła z szyną oraz rozmiaru powierzchni kontaktu;

d) wyliczenie mikropoślizgów i obliczenie sił stycznych mikropoślizgów i momentów spinu, które powstają w wyniku wzajemnego oddziaływania koło – szyna.

e) dodanie sił i momentów w kontakcie, powiązanych z każdym kołem, do wektora zewnętrznych sił działających w układzie. Zastosowanie formalizmu układów wielocłonowych w celu otrzymania rozwiązania, nowych położeń i prędkości układu dla kolejnego kroku czasowego $t + \Delta t$;

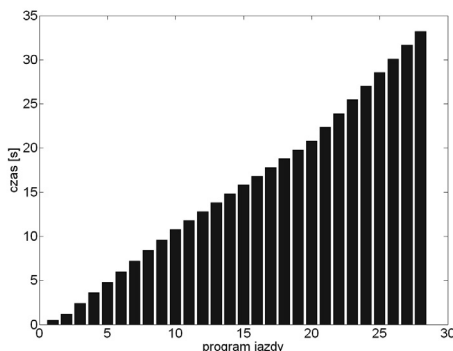
f) uaktualnienie układu dla kolejnej chwili czasu poprzez przyjęcie danych początkowych z kroku poprzedniego w celu wyznaczenia parametrów powierzchni powiązanych z każdą parą koło – szyna;

g) kontynuowanie całego procesu dla nowego kroku czasowego aż do osiągnięcia czasu końcowego przeprowadzanej analizy.

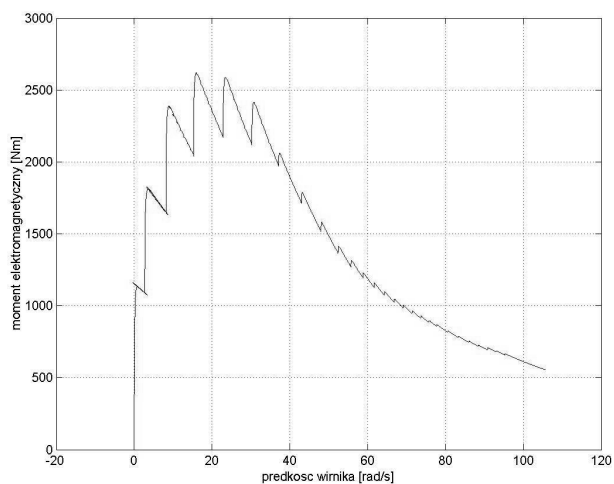
Szczegółowe zależności wykorzystywane do obliczeń realizowanych w punktach a – g prezentowanego algorytmu można znaleźć w pracach [5].

3. SYMULACJE NUMERYCZNE

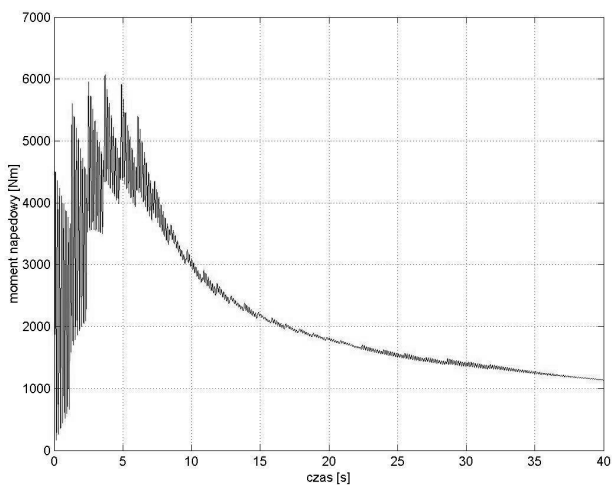
Opracowany model silnika szeregowego oraz układu mechanicznego zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink. Prezentowane na poniższych rysunkach (rys. 8-9) symulacje komputerowe przebiegów zmian momentów elektromagnetycznego i napędowego zostały przeprowadzone dla programu jazdy lokomotywy (zmiany nastaw rezystancji dodatkowych) przedstawionego na rys. 6.



Rys. 6. Program jazdy



Rys. 7. Przebieg zmian momentu elektromagnetycznego na silniku S1 w funkcji prędkości kątowej wirnika silnika S1



Rys. 8. Przebieg zmian momentu napędowego na pierwszej osi zestawu kołowego w funkcji czasu jazdy lokomotywy

Jak wynika z przebiegów przedstawionych na rysunkach 7 i 8 przełączanie pomiędzy poszczególnymi programami jazdy powoduje generowanie drgań skrętnych w układach napędowych. Częstość występowania pików tych oscylacji, obserwowanych szczególnie w pierwszej fazie rozruchu, wynika z czasu realizowania poszczególnych programów jazdy.

4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono komputerowe narzędzie do badania dynamicznego zachowania pojazdów szynowych w ruchu po torze. Opracowano w tym celu programy komputerowe w środowisku Matlab/Simulink. W celu uwzględnienia wszystkich istotnych cech właściwych dla pojazdów szynowych opracowano ponadto pakiet dedykowanych programów dotyczących budowy modelu toru nominalnego z uwzględnieniem nieregularności toru. Przedstawiono i oprogramowano ogólny model kontaktu koło – szyna pozwalający na wyznaczenie w trakcie prowadzonej analizy współrzędnych punktów kontaktu pomiędzy kołem a szyną.

Przedstawiony model pozwala na analizę stanu dynamicznego układu napędowego elektrowozu EU07 w przypadku szeregowego połączenia silników prądu stałego. Opracowany model umożliwia uwzględnienie rzeczywistych wartości rezystancji dodatkowych w obwodzie tworników i w obwodzie wzbudzeń, pozwala zatem oddać rzeczywiste nastawy podczas rozruchu pojazdu trakcyjnego. Model ten umożliwia wyznaczenie momentu trakcyjnego w różnych stanach dynamicznych pojazdu (rozruch, praca ustalona) w zależności od obciążenia lokomotywy.

LITERATURA

1. Duda S., Karwacki J.: Methodology for the dynamic analysis of the single wheelset running on turnout. ZN Kat. Mech. Stos. "Modelling and Optimization of Physical Systems". Gliwice 2009, p. 23-29.
2. Duda S., Kciuk S. Trawiński T.: Modelowanie układu napędowego elektrowozu EU07. Archiwum Konferencji PTETIS, vol. 18, 2003.
3. Duda S.: Simulation of railway vehicle motion on the straight track. "Journal of KONES" 2010, Vol. 17, No. 1, p.117-124.
4. Mężyk A.: „Analiza i kształtowanie cech dynamicznych napędów elektromechanicznych”. Monografia, Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2002.
5. Shabana A. A., Zaazaa K. E., Sugiyama H.: Railroad vehicle: dynamics. A Computational Approach. Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
6. Świtoński E. i in.: Modelowanie mechatronicznych układów napędowych. Monografia. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2004.

ELECTROMECHANICAL MODEL OF ELECTRIC LOCOMOTIVE EU07

Summary. This paper presents an approach to the modeling and dynamic analysis of complex electromechanical systems comprising drive systems of machines and mechanical devices that transfer high power. The complexity of dynamic phenomena in the systems considered here requires the application of an electromechanical model with feedback between the mechanical part and the electrical part. A multibody method was applied in the modeling mechanical parts of railway vehicle. Dynamic phenomena in electric motors are a source of vibration in electromechanical drive systems, it is therefore necessary to develop models of such systems. Mathematical models of direct current drives are discussed.