

BADANIA NUMERYCZNE ELEKTRYCZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO POJAZDU

Streszczenie

W pracy przedstawiono numeryczny model pojazdu z napędem elektrycznym. Opracowany układ sterowania oraz przyjęty model napędu umożliwia utrzymanie zadanej przebiegu prędkości jazdy. Numeryczny model układu napędowego pojazdu został opracowany w programie Matlab/Simulink a parametry regulatora PID zostały dobrane przy wykorzystaniu automatycznego narzędzia PID Tune.

Badania numeryczne pojazdu z napędem elektrycznym i zaproponowanego układu regulacji zostały przeprowadzone dla trzech wariantów obciążenia pojazdu. Uzyskane wyniki badań ilustrują proces przetwarzania energii w elektrycznym układzie napędowym i potwierdzają poprawność przyjętego układu regulacji oraz jego parametrów.

Opracowany model numeryczny pojazdu z napędem elektrycznym zostanie wykorzystany do dalszych badań hybrydowych układów napędowych pojazdów.

WSTĘP

Rozważany w artykule elektryczny układ napędowy pojazdu jest częścią zbudowanego laboratoryjnego hybrydowego napędu elektryczno-hydrostatycznego. W układzie elektrycznym źródłem energii jest akumulator elektryczny a w układzie hydrostatycznym akumulator hydropneumatyczny. Połączenie tych dwu systemów pozwala na efektywniejsze przetwarzanie energii niż pojedynczo w układzie elektrycznym lub hydrostatycznym. Proponowany przez autorów hybrydowy układ napędowy pojazdu służy do rozpędzania i hamowania odzyskowego. Matematyczny opis modelu układu napędowego pojazdu został opisany w pracach [1, 3]. Badania elektrycznego układu napędowego były podjęte wcześniej i zostały szczegółowo opisane w pracach [5, 6].

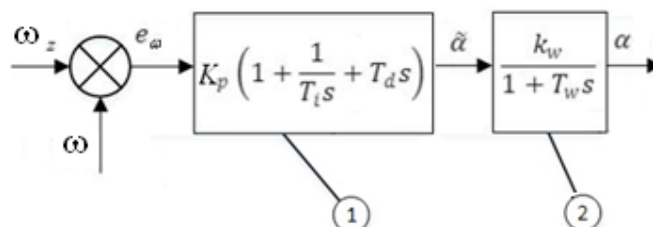
Autorzy pracy [2] przedstawili badania wykonane przy użyciu bardziej skomplikowanego układu regulacji, gdzie parametry regulatora zostały przyjęte na podstawie doświadczenia zdobytego przy budowie układów sterowania. Odmienne metodyka doboru parametrów regulatora PID mająca na celu zapewnienie założonego cyklu jazdy została przedstawiona w pracy [4].

W niniejszej pracy przedstawiony został układ sterowania prędkością pojazdu, który został uproszczony do jednego regulatora PID. Na podstawie opisu matematycznego pojazdu oraz układu elektrycznego przedstawionego w pracy [4] został opracowany model numeryczny w programie Matlab/Simulink. Podczas badań został wykorzystany cykl jazdy, podczas którego występują dwa etapy rozpędzania, jazdy ze stałą prędkością i hamowania odzyskowego pojazdu, które są oddzielone od siebie etapem kiedy pojazd został zatrzymany. W pracy przedstawiono wyniki analizy doboru parametrów regulatora PID na podstawie przebiegu zadanej prędkości i prędkości wyznaczonej podczas symulacji. Badania zostały przeprowadzone dla kilku wariantów uwzględniających przykładowo zmianę masy pojazdu. Przedstawiony model układu napędu i uzyskane wyniki badań numerycznych elektrycznego napędu pojazdu zostaną wykorzystane do dalszych badań związanych z opracowaniem układu regulacji napędu hybrydowego.

1. MATEMATYCZNY MODEL ELEKTRYCZNEGO NAPĘDU POJAZDU

Opracowany układ regulacji prędkości pojazdu w elektrycznym napędzie pojazdu służy do utrzymania zadanej prędkości pojazdu V_z . Zgodnie z przedstawionym w pracy [4] modelem zmiana prędkości pojazdu jest zadawana poprzez zmianę przebiegu sygnału α z regulatora, który steruje przepływem energii w układzie pomiędzy akumulatorem i silnikiem elektrycznym. W układzie regulacji na podstawie zadanej prędkości V_z , wyznaczana jest prędkość obrotowa koła w (na podstawie zadanej prędkości V_z i promienia koła) i wyznaczany jest sygnał α , który reguluje przekształtnikiem napięcia i w efekcie zmieniane jest napięcie silnika. Zmiana napięcia zasilającego silnik wpływa na zmianę prądu co w efekcie wywołuje zmianę momentu napędowego silnika elektrycznego i pozwala na zmianę prędkości pojazdu.

Analiza metodyki projektowania układu regulacji elektrycznych układów napędowych, została opisana bardziej szczegółowo w pracach [5, 7], w połączeniu z opisem modelu pojazdu z elektrycznym układem napędowym przedstawionym w pracy [4] pozwoliła na podjęcia badań związanych z możliwością uproszczenia tego modelu do postaci przedstawionej na rysunku 1. Wówczas układ regulacji składa się z pojedynczego regulatora PID.



Rys. 1. Schemat układu regulacji prędkości pojazdu: 1 – regulator PID, 2 – człon wykonawczy w przekształtniku napięcia;

Matematyczny opis układu regulacji przyjmuje następującą postać:

$$e_{\omega}(t) := \omega_z(t) - \alpha(t) \quad (1)$$

$$i_{reg}(t) = K_p \left[e_{\omega}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_{\omega}(\tau) d\tau + T_d \dot{e}_{\omega}(t) \right] \quad (2)$$

$$\tilde{\alpha}(t) = \Psi_2(\tilde{e}(t)) \quad (3)$$

$$T_w \dot{\alpha}(t) + \alpha(t) = k_w \tilde{\alpha}(t) \quad (4)$$

gdzie: ω_z – zadana prędkość kątowa wału silnika, K_p , T_i , T_d – stałe regulatora PID, k_w , T_w – stałe określające działanie przekształtnika napięcia, Ψ_2 – funkcja ograniczająca wartość $\alpha \in [0,1]$;

2. DOBÓR PARAMETRÓW REGULATORA PID

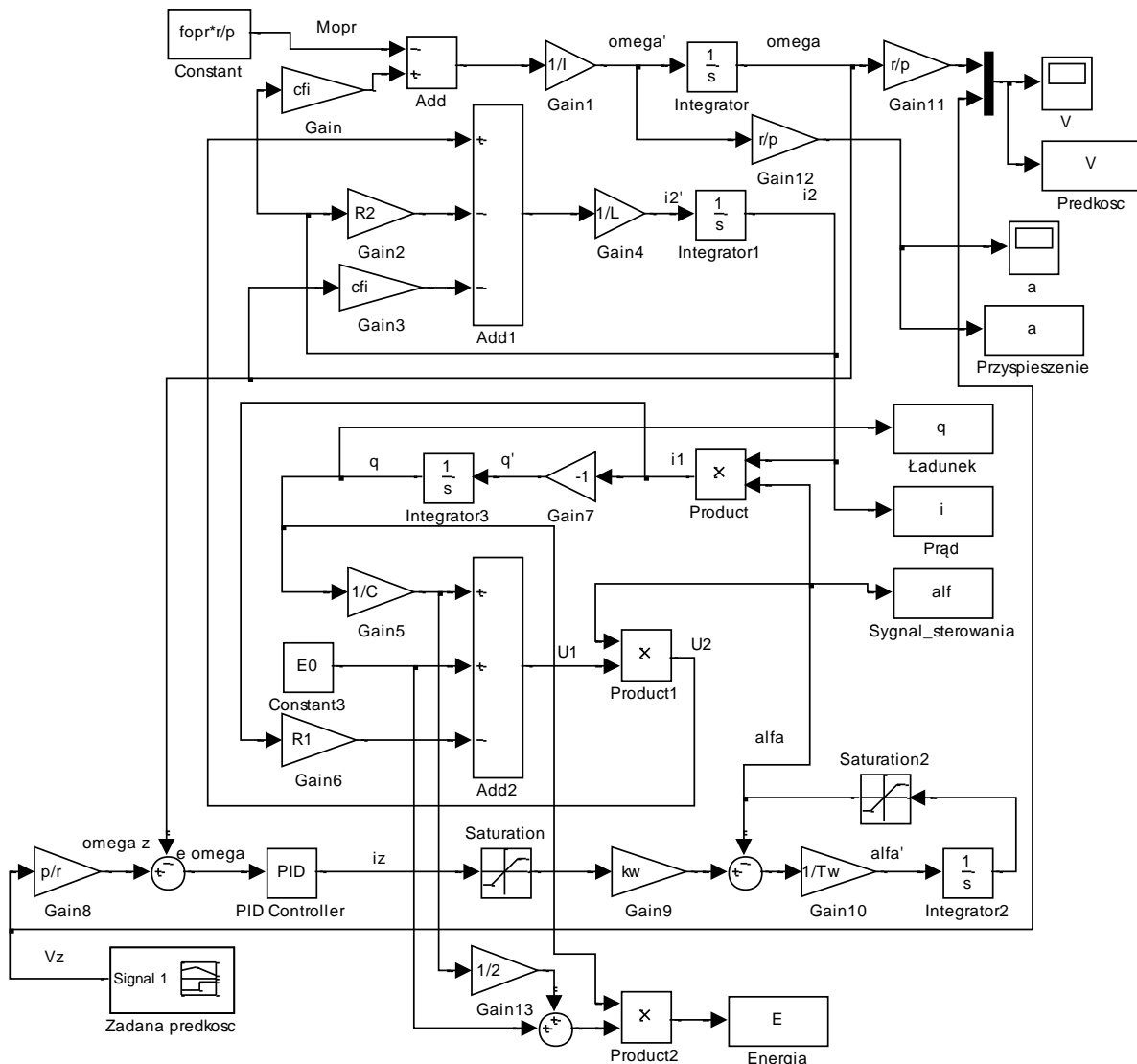
Przyjęty matematyczny model elektrycznego układu napędowego pojazdu składa się z trzech podukładów: mechanicznego, elektrycznego i sterowania. Model ten posłużył do opracowania programu symulacyjnego w środowisku Matlab/Simulink, gdzie uwzględniono odpowiednie parametry związane z oporami ruchu pojazdu oraz działaniem układu elektrycznego i układu regulacji. Do opisu modelu wykorzystano standardowe bloki z biblioteki pakietu Simulink. Na rysunku 2 przedstawiono schemat opracowanego numerycznego modelu pojazdu z napędem elektrycznym. Oznaczenia bloków nazwami odpowiadają oznaczeniom używanym w opisie

matematycznego modelu napędu elektrycznego pojazdu przedstawionego w pracy [4]. W modelu tym prędkość zadana V_z , jako sygnał wejściowy pojawia się w bloku *Zadana prędkość*. Natomiast wartość prędkości pojazdu V , wyznaczana w przyjętym modelu napędu z układem regulacji, pojawia się w bloku *Prędkość*, gdzie uzyskiwane wartości są zapisywane do zbioru.

Parametry regulatora PID zostały wyznaczone przy użyciu aplikacji PID Tuner. Ze względu na pojawiające się niewielkie przestereowania na przebiegach przyspieszeń konieczna była zmiana parametrów aplikacji PID Tune. Wyznaczone w ten sposób parametry regulatora PID posłużyły do przeprowadzenia dalszych badań symulacyjnych.

Badania numeryczne modelu pojazdu z elektrycznym układem napędowym w opracowanym programie zostały przeprowadzone dla następujących wartości parametrów układu elektrycznego:

- $m = 2000$ [kg] – masa pojazdu,
- $r = 0,32$ [m] – promień koła,
- $p = 8$ – przełożenie przekładni między kołem a osią silnika elektrycznego,
- $f_{opr} = 255$ [N] – stały opór ruchu pojazdu.
- Wybrany model akumulatora elektrycznego określają następujące parametry:
 - $E_0 = 216$ [V] – napięcie wstępne,
 - $C = 86,5$ [kF] – pojemność uzupełniająca,



Rys. 2. Model symulacyjny pojazdu z napędem elektrycznym

- $R_1 = 0,1 [\Omega]$ – rezystancja wewnętrzna akumulatora,
- $q_{max} = 415 [kC]$ – największy ładunek elektryczny, który może być zgromadzony w akumulatorze,
- $\epsilon_{AK}(q_{max}) = 90,636 [MJ]$ - maksymalna ilość energii zgromadzonej w akumulatorze.

Przyjęto różne warianty badań, wartości parametru określającego masę pojazdu, zmieniano w zakresie do 25% masy bazowej pojazdu. Badany pojazd określają następujące warianty parametrów:

- $m_1 = 2000 [kg]$ – masa pojazdu bazowego,
- $m_2 = 2500 [kg]$ – zwiększona masa pojazdu,
- $m_3 = 2000 [kg]$ – zmniejszona masa pojazdu,
- $J = m_i \cdot r^2 / p^2$ – moment bezwładnika odwzorowującego masę pojazdu, gdzie $i = [1,2,3]$ oznaczają kolejne obciążenia pojazdu, wówczas: $J_1 = 3,2 [kg \cdot m^2]$, $J_2 = 4 [kg \cdot m^2]$, $J_3 = 2,4 [kg \cdot m^2]$,
- $f_{opr} = 0,013 \cdot m_i \cdot g$ – opór ruchu pojazdu, gdzie $i = [1,2,3]$, wówczas: $f_{opr1} = 255 [N]$, $f_{opr2} = 318,8 [N]$, $f_{opr3} = 191,3 [N]$.

Parametry PID w przyjętym układzie regulacji wyznaczone przy pomocy narzędzia *PID Tune* wynoszą:

- dla regulatora prędkości PID: $K_p = 0,264$, $T_i = 0,625 [s]$, $T_d = 0,0157 [s]$
- dla członu inercyjnego pierwszego rzędu: $T_w = 1 \cdot 10^{-3} [s]$, $k_w = 1$.

Do oceny wartości parametrów regulatora PID przyjęto kryterium oceny, które uwzględnia przebieg sygnału prędkości zadanej i uzyskanej:

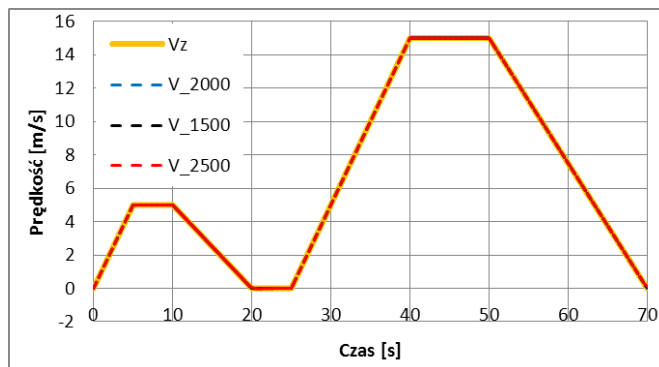
$$W_V = \frac{\sum_{i=1}^N (v_{zi} - v_i)^2}{\sum_{i=1}^N v_{zi}^2} \quad (5)$$

gdzie: N – ilość punktów pomiarowych, i – ty punkt pomiarowy;

Im mniejsza jest wartość wskaźnika oceny W_V tym najmniejsze są różnice pomiędzy przebiegiem prędkości zadanej i wyznaczonej. Najniższa wartość świadczy o możliwie najlepszym doborze parametrów regulatora.

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg prędkości pojazdu wyznaczonej przy użyciu przyjętego pojedynczego regulatora PID. Uzyskane przebiegi prędkości nakładają się na siebie niezależnie od różnych mas pojazdu.

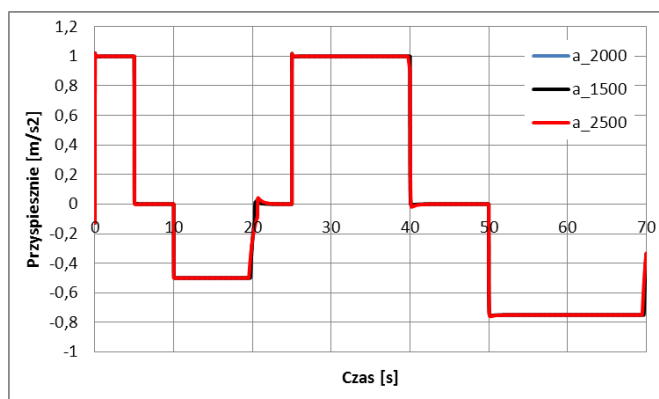
Przykładowo dla pojazdu o masie 2000 [kg] dla całego cyklu jazdy wartość wskaźnika jakości wynosi $W_{V,2000} = 5,358 \cdot 10^{-7}$. Dla porównania przedstawiono wyniki badań z pracy [4], które przeprowadzono przy takiej samej masie pojazdu, przyjęty wskaźnik wynosi $W_{VT} = 0,880 \cdot 10^{-4}$. Uzyskana więc wartość wskaźnika jakości jest o dwa rzędy wielkości mniejsza niż uzyskana wg. modelu i układu regulacji przyjętego w pracy [4]. To porównanie, jak i wyniki uzyskanych badań świadczą o poprawności doboru parametrów regulatora PID.



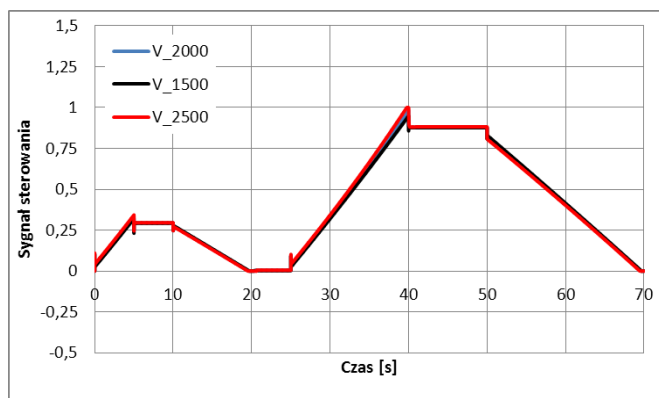
Rys. 3. Przebieg prędkości pojazdu przy użyciu regulatora PID: V_z – prędkość zadana, V_{TD} – prędkość obliczona

3. BADANIA NUMERYCZNE NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO

Badania, jak już wcześniej wspomniano były przeprowadzone w trzech wariantach: przy bazowej masie pojazdu 2000 [kg], zwiększonej 2500 [kg] i zmniejszonej 1500 [kg]. W niniejszym rozdziale przedstawiono przepływ energii w elektrycznym układzie napędowym pojazdu podczas rozpędzania i hamowania odzyskowego w postaci graficznej.



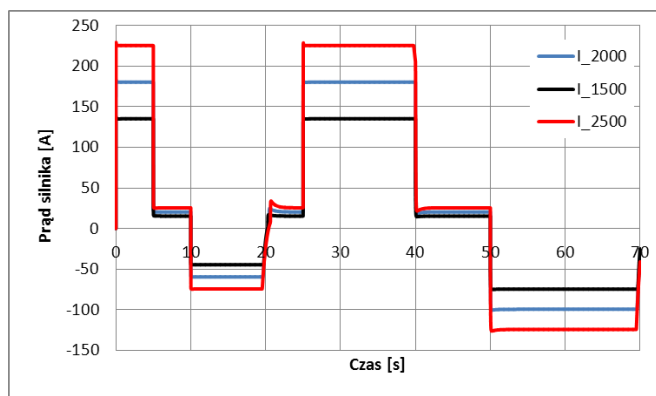
Rys. 4. Przyspieszenie pojazdu



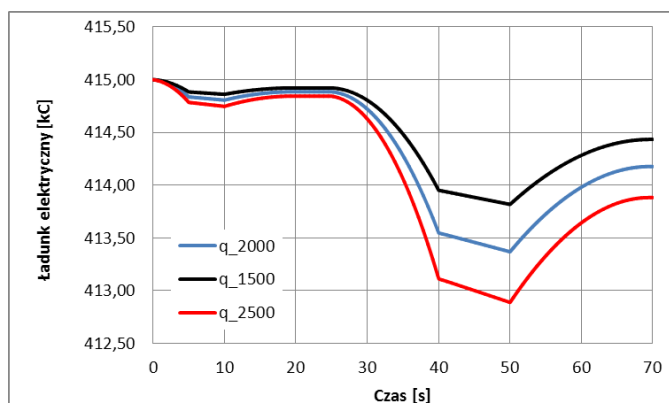
Rys. 5. Sygnał sterowania

Na rysunku 4 pokazany został przebieg przyspieszeń pojazdu. Maksymalna wartość przyspieszenia wynosi 1 [m/s²]. Podczas hamowania w pierwszej fazie wynosi 0,5 [m/s²] a w drugiej 0,75 [m/s²]. Na prezentowanym przebiegu przyspieszeń nie można zauważyć znaczących różnic pomiędzy kolejnymi przypadkami obciążenia. Przyjęty układ regulacji oraz zaproponowana metodyka doboru parametrów regulatora PID zapewnia poprawny przebieg sygnału przyspieszenia pojazdu bez zbędnych przesterowań.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg sygnału sterowania α , na podstawie którego wyznaczane było napięcie zasilania silnika elektrycznego oraz prąd płynący z akumulatora. Przebieg sygnału mieści się w przedziale dopuszczalnych wartości sterowania [0,1]. Przebieg tego sygnału umożliwia utrzymanie założonego cyklu prędkości jazdy łącznie z zatrzymaniem i ponownym ruszaniem pojazdu. W trakcie wcześniejszych badań prowadzonych z przyjętym układem regulacji zgodnym z [4] obserwowane były trudności z utrzymaniem założonego sygnału sterowania. Powodowało to lokalne przesterowanie prędkości, które można było również zaobserwować na przebiegach przyspieszeń. Natomiast na przedstawionym wykresie, podobnie jak w przypadku przebiegu przyspieszenia, nie stwierdzono znacznych różnic pomiędzy przebiegami odpowiadającymi zmienionej masie pojazdu.



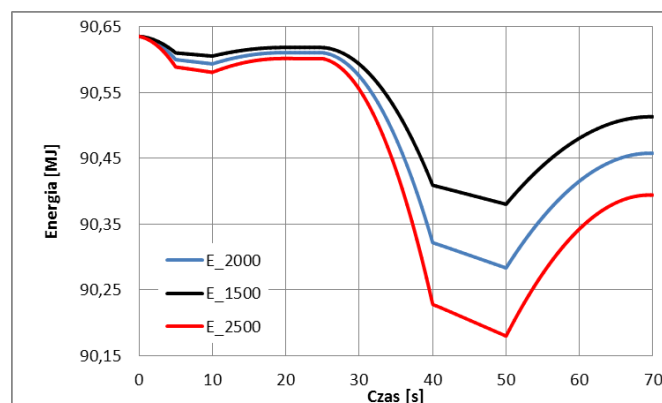
Rys. 6. Prąd przepływający przez silnik elektryczny



Rys. 7. Ładunek elektryczny zgromadzony w akumulatorze

Prąd przepływający przez silnik elektryczny jest przedstawiony na rysunku 6. Przy rozpędzaniu pojazdu widoczne są zmiany prądu, którego maksymalna wartość dochodzi do 225 A przy masie pojazdu 2500 [kg]. W przypadku masy pojazdu 2000 [kg] wartość prądu osiąga 180 [A] a przy najmniejszym obciążeniu 1500 [kg] wartość prądu wynosi 135 [A]. Przedziały czasu, w których widoczne są ujemne wartości prądu przedstawiają etapy odzyskowego hamowania. Odzyskiwany prąd podczas hamowania przy mniejszej intensywności hamowania 0,5 [m/s²] w przypadku obciążenia bazowego wynosi ok 60 [A] a podczas wyższej intensywności hamowania 0,75 [m/s²] jest równy ok. 100 [A]. Najwyższe prądy zasilania silnika są obserwowane przy najwyższej masie pojazdu (225 [A]), co jest widoczne również podczas odzysku energii w przypadku hamowania (124,5 [A]). Biorąc pod uwagę pojazd o najmniejszej masie, to w jego układzie napędowym obserwowane są najniższe prądy zasilania silnika elektrycznego (135 [A]), jak również najniższe prądy podczas hamowania odzyskowego (74,7 [A]).

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zmian ładunku elektrycznego zgromadzonego w akumulatorze. Widoczne są zmiany wielkości ładunku w początkowej fazie spowodowane rozpędzaniem pojazdu i utrzymywaniem stałej prędkości w zakresie od 5 [s] do 10 [s]. Kolejna faza jest związana z hamowaniem odzyskowym, gdzie do akumulatora dopływa energia, lecz ilość ładunku jest stosunkowo niewielka. W czasie od 20 [s] do 25 [s] pojazd zatrzymuje się i ładunek nie jest pobierany z akumulatora, ani do niego dostarczany. W okresie od 40 [s] do 50 [s] pojazd porusza się ze stałą prędkością 15 [m/s]. W zakresie tym widoczny jest wyższy poziom poboru ładunku z akumulatora niż to miało miejsce przy stałej prędkości 5 [m/s]. Zmiana ta jest związana z wyższymi oporami ruchu, które są zależne od prędkości jazdy. W ostatniej fazie pojazd jest hamowany odzyskowo a ładunek jest doprowadzany do akumulatora elektrycznego. Największe różnice ilości ładunku są obserwowane w przypadku pojazdu posiadającego najwyższą masę. Dla tego przypadku na koniec cyklu jazdy uzyskano najniższą wartość ładunku pozostającego w akumulatorze tj. 90,39 [kC], zaś w pojeździe o masie 2000 [kg] pozostało 90,46 [kC]. W pojeździe o masie 1500 [kg] pozostało najwięcej ładunku 90,51 [kC]. Podobnie jak w przypadku zmian prądów podczas rozpędzania i hamowania pojazdu najwyższa wartość pobieranego i oddawanego ładunku ma miejsce w przypadku pojazdu o najwyższej masie, choć ostatecznie ilość zużytego ładunku też jest największa.



Rys. 8. Energia zgromadzona w akumulatorze

Przebieg ilości energii zgromadzonej w akumulatorze w rozważanym układzie napędowym przedstawiony został na rysunku 8. Charakter przebiegu jest podobny do przebiegu zmian ilości ładunku w akumulatorze. Biorąc pod uwagę pojazd o masie 2000 [kg], w pierwszym etapie ruchu pojazdu energia zmniejszyła się o 36 [kJ], po czym w czasie hamowania zwiększyła się o 13,7 [kJ]. W drugiej fazie rozpędzania energia zmniejszyła się o 327,5 [kJ] a w czasie hamowania odzyskowego zwiększyła się o 174,5 [kJ]. Zatem w czasie analizowanego ruchu pojazdu zostało rozproszone 175,3 [kJ] energii. W układzie napędowym bez możliwości hamowania odzyskowego na tym samym odcinku drogi w sumie zostałyby rozproszone 363,5 [kJ] energii. Porównanie przebiegów dla pojazdów o masie 2500 [kg] i 1500 [kg] wskazuje na podobny charakter przebiegu zmian energii różniący się wartościami. Rozważając sumę rozproszonej energii to największa wartość jest rozpraszana w przypadku pojazdu o najwyższej masie (238 [kJ]), natomiast najmniejsza w przypadku pojazdu o najmniejszej masie (119 [kJ]).

PODSUMOWANIE

Przyjęty do badań matematyczny model elektrycznego układu napędowego pojazdu umożliwił opracowanie jego modelu numerycznego w programie Matlab/Simulink. Dla zmodyfikowanego i uproszczonego układu sterowania dokonano doboru parametrów

regulatora PID przy pomocy narzędzia *PID Tune*. Umożliwiło to przeprowadzenie badań numerycznych układu napędowego pojazdu w których rozpatrywano trzy przypadki obciążenia pojazdu – zmiany jego masy. Wyniki uzyskanych i przedstawionych badań wskazują, że parametry regulatora zostały przyjęte prawidłowo.

Przedstawione wyniki potwierdzają także poprawność przyjętego modelu matematycznego i właściwe opracowanie modelu numerycznego pojazdu z elektrycznym układem napędowym.

Opracowany model napędu i układu sterowania zostanie wykorzystany do dalszych badań związanych z doskonaleniem elektryczno-hydrostatycznego modelu napędowego pojazdu.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST8/06822.

BIBLIOGRAFIA

1. Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: Matematyczny model napędu elektryczno-hydrostatycznego. Technika Transportu Szynowego 10/2013.
2. Grzesikiewicz W., Zbiciak A., Michalczyk R.: Analiza modelu napędu pojazdu elektrycznego w programie Matlab/Simulink. Logistyka 6/2014.
3. Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: Matematyczny opis napędu pojazdu elektrycznego. Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Monografia Nr 278, Koszalin 2014.
4. Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: Analiza doboru układu regulacji do elektrycznego napędu pojazdu, Logistyka, 6/2015.
5. Koczara W.: Wprowadzenie do napędu elektrycznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
6. Szumanowski A.: Hybrid electric Vehicle Drives Design. Institute for Sustainable Technologies. Radom 2006.
7. Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2012.

NUMERICAL SIMULATIONS OF A VEHICLE WITH ELECTRIC DRIVE

Abstract

In the paper, we present a numerical model of a vehicle with an electric drive. Proposed control system and the model of the vehicle allow maintaining a desired speed of the vehicle. The model is developed in Matlab/Simulink software, while proportional-integral-derivative regulator (i.e. PID regulator) parameters are determined using PID-tune module.

Numerical investigations of the vehicle with an electric drive along and with the proposed PID regulator are carried out for the three variations of the vehicle load. Finally, we present the results illustrating the process of energy conversion in the electric drive. These results and confirm that the parameters of the PID regulator are determined correctly. The proposed numerical model of vehicle with electric drive will be employed for further investigations of the hybrid electro-hydrostatic drive.

Autorzy:

dr inż. **Michał Makowski** – Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, email: michal.makowski@simr.pw.edu.pl
 prof. nzw. dr hab. inż. **Wiesław Grzesikiewicz** – Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, e-mail: wgr@simr.pw.edu.pl
 dr inż. **Lech Knap** – Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, email: lknep@simr.pw.edu.pl
 mgr inż. **Janusz Pokorski** – Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, email: Janusz.Pokorski@simr.pw.edu.pl