ARCHIWUM MOTORYZACJI
2-3, pp. 103-120 (2002)

Teoretyczna i doświadczalna analiza stanów energetycznych cykli jazdy hybrydowych elektromechanicznych napędów pojazdów

JERZY OCIOSZYŃSKI

Politechnika Warszawska
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich

Artykuł omawia teoretyczne i doświadczalne możliwości pozyskiwania energii na podstawie analizy szeregowego hybrydowego napędu elektromechanicznego. Stanowisko badawcze, zbudowane dla potrzeb niniejszej pracy, umożliwia poznanie zasad pozyskiwania energii i konstrukcji układów sterowania (w odniesieniu do pierwotnego źródła energii), decydujących o akumulacji energii w przypadku nadmiaru mocy silnika spalinowego nad aktualną mocą oporów ruchu. Model matematyczny napędowego silnika elektrycznego i układu regulacji, w odniesieniu do stanowiska badawczego, umożliwił eksperymenty symulacyjne i badanie energii hamowania pojazdu przekazywanej do baterii akumulatorów elektrochemicznych i rezystorów obciążenia. Możliwa była również weryfikacja tych badań w warunkach stanowiska badawczego.

1. Wstęp

Pojazdy samochodowe o napędzie hybrydowym, są zaliczane do energooszczędnych i proekologicznych. Argumenty przemawiające za energooszczędnością to możliwość pozyskiwania energii hamowania pojazdów oraz akumulacji energii w przypadku nadmiaru mocy pierwotnego źródła energii nad aktualną mocą oporów ruchu [1]. Natomiast problemy emisji toksycznych gazowych i stałych składników spalin są uzależnione od urządzeń stanowiących pierwotne i wtórne źródło energii.

W przypadku pojazdów hybrydowych elektromechanicznych, w których wtórnym źródłem energii są akumulatory elektrochemiczne, zanieczyszczenie atmosfery toksycznymi gazowymi składnikami spalin zależy od rodzaju paliwa pierwotnego gazowego bądź stałego, używanego do produkcji energii elektrycznej. Można mówić o braku szkodliwych zanieczyszczeń, jeżeli energia elektryczna jest produkowana w hydroelektrowniach lub elektrowniach atomowych (np. Szwajcaria). W Polsce ponad 90% energii elektrycznej jest wytwarzana w elektrowniach stosujących węgiel kamienny i brunatny, stąd znaczna ilość szkodliwych zanieczyszczeń. W przypadku innych pojazdów hybrydowych, w których wtórnym źródłem energii są akumulatory mechaniczne i hydrauliczne zanieczyszczeń brak. Natomiast wydzielanie szkodliwych gazowych i stałych

składników spalin związanych z eksploatacją silnika spalinowego (pierwotne źródło energii) jest uzależnione od rodzaju użytego silnika i charakteru zmian jego obciążenia w realizowanym cyklu jazdy [2]. Silnik ten dostarcza do układu stałą niezależną od rodzaju pracy (fazy cykli jazdy) wartość mocy. Rodzaj silnika spalinowego i charakter zmian jego obciążenia znacznie zmniejsza emisję toksycznych składników spalin. W ostatnich latach nastąpił liczący się rozwój badań symulacyjnych pojazdów o napędzie hybrydowym, których wyniki umożliwiły powstanie licznych nowych konstrukcji. Badania te dały możliwość porównania właściwości eksploatacyjnych i wybranych danych technicznych podstawowych elementów składowych konstrukcji. Należą do nich: baterie akumulatorów elektrochemicznych, silniki cieplne pierwotnego źródła energii, różne rodzaje napędowych silników elektrycznych, prądnice elektryczne, itp.

Analizując wykonane i opublikowane badania z zakresu budowy i działania hybrydowych układów napędowych pojazdów można zastanawiać się nad wyborem odpowiedniej struktury napędów. Można w tym przypadku mówić o strukturach mających dwa lub trzy źródła energii, o hybrydowych napędach elektromechanicznych szeregowych lub równoległych, czy o innych np. dzielonych napędach [3, 4].

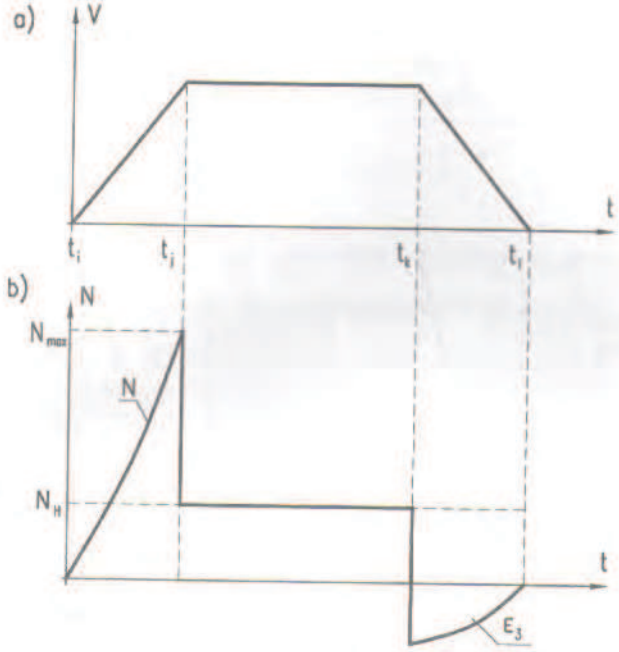
W niniejszej publikacji, analizując szeregowy hybrydowy elektromechaniczny napęd pojazdu, omówiono teoretyczne i doświadczalne możliwości pozyskiwania energii. Zbudowane stanowisko badawcze modelu fizycznego umożliwiło poznanie zasad pozyskiwania energii i konstrukcji układów sterowania (szczególnie w odniesieniu do pierwotnego źródła energii), decydujących o akumulacji energii w przypadku nadmiaru mocy silnika spalinowego nad aktualną mocą oporów ruchu. Opracowany model matematyczny napędowego silnika elektrycznego i układu regulacji w odniesieniu do stanowiska badawczego modelu fizycznego, umożliwił eksperymenty symulacyjne stanowiące badania energii hamowania pojazdu przekazywanej do baterii akumulatorów elektrochemicznych i rezystorów obciążenia. Możliwa była również weryfikacja tych badań w warunkach stanowiska badawczego modelu fizycznego.

2. Teoretyczne możliwości pozyskiwania i akumulacji energii w pojazdach o napędzie hybrydowym

Prosty cykl jazdy pojazdu o napędzie hybrydowym składa się z fazy ruchu przyspieszonego, ustalonego i opóźnionego. Ilustrację tego cyklu przedstawiono na rys.1, przy czym na rysunku 1a przedstawiono wykres prędkości jazdy w funkcji czasu, a na rysunku 1b wykres mocy napędowej na kołach jezdnych w funkcji czasu. Przyjmując dla uproszczenia, że wartość średnia mocy cyklu N_H jest równa wartości mocy oporów ruchu podczas jazdy ze stałą prędkością, wyrażenie na wartość średnią mocy, prostego cyklu jazdy opisuje zależność:

$$N_H = \frac{E_H}{t_l} = \frac{\int_{t_1}^{t_l} N(t)\mathrm{d}t}{t_l}, \tag{1}$$

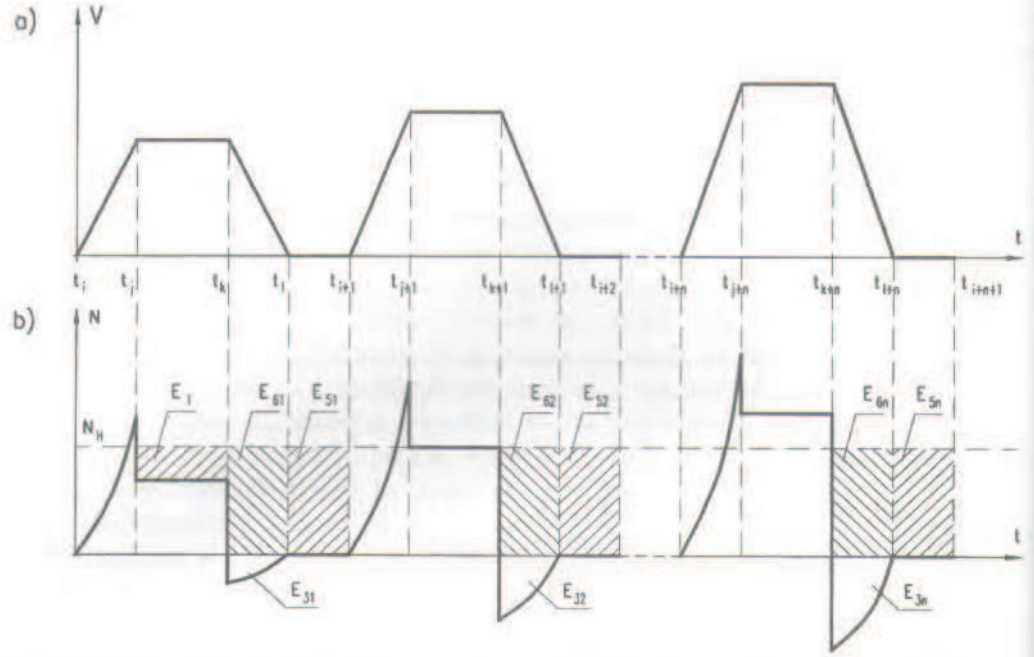
w której E_H — całkowita energia cyklu, $N(t)$ — moc oporów ruchu w chwili t (w przypadku pozyskiwania energii oznacza się ją jako ujemną), t_i — czas rozpoczęcia cyklu , t_l — czas trwania cyklu.



Rys. 1. Ilustracja prostego cyklu jazdy: a — wykres prędkości jazdy w funkcji czasu, b — wykres mocy napędowej na kołach jezdnych w funkcji czasu (N — moc napędowa, N_{max} — wartość maksymalna mocy napędowej, N_H — moc średnia cyklu równa stałej mocy pierwotnego źródła energii, t_i — czas rozpoczęcia ruchu przyspieszonego (początek cyklu), t_j — czas rozpoczęcia ruchu ustalonego, t_k — czas rozpoczęcia ruchu opóźnionego, t_l — czas trwania cyklu, E_3 — energia możliwa do pozyskania w fazie ruchu opóźnionego.
Fig. 1. Illustration of a simple driving cycle: a — dribing speed distribution versus time, b — distribution of power at driving power, N_{max} — maximum driving power, t_i — time of acceleration motion start (the cycle initiation), t_j — time of stable motion start, t_k — time of retarded motion start, t_l — cycle duration time, H_H — the cycle mean power equal to constant power of energy primary source) E_3 — energy posiible to recuperate during deceleration phase.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowo ilustrację złożonego cyklu jazdy z tym, że rys. 2a przedstawia wykres prędkości jazdy w funkcji czasu, a rys. 2b wykres mocy napędowej na kołach jezdnych w funkcji czasu. Analizując złożony cykl jazdy pod kątem możliwości pozyskiwania energii hamowania pojazdu oraz akumulacji energii w przypadku nadmiaru mocy pierwotnego źródła energii nad aktualną mocą oporów ruchu można stwierdzić:

- istnieje możliwość pozyskiwania energii w fazach hamowania cyklu jazdy. Akumulacja energii może mieć miejsce przy jeździe ze stałą prędkością, przy jeździe z opóźnieniem i podczas postoju pojazdu [5]. W pierwszym przypadku jest możliwa akumulacja energii pierwotnego źródła energii, jeżeli jego moc przekracza wartość



Rys. 2. Ilustracja złożonego cyklu jazdy: a — wykres prędkości jazdy w funkcji czasu, b — wykres mocy napędowej na kołach jezdnych w funkcji czasu (E_1 — energia możliwa do akumulacji przy jeździe ze stałą prędkością, E_3 — energia możliwa do pozyskania w fazach ruchu opóźnionego, E_5 — energia możliwa do akumulacji podczas postoju pojazdu, E_6 — energia możliwa do akumulacji podczas ruchu opóźnionego).
Fig. 2. Illustration of complex driving cycle: a — driving speed distribution versus time, b — distribution of power at driving wheels against time (E_1 — energy feasible to accumulation at constant speed driving, E_3 — energy feasible to recover in retarded motion phases, E_5 — energy feasible to accumulation at machine standstill, E_6 — energy feasible to accumulation at retarded motion.

rzeczywistą (aktualną) mocy oporów ruchu pojazdu. W drugim i trzecim przypadku można akumulować całą energię pierwotnego źródła energii;

- energia mechaniczna hamowania możliwa do pozyskania, przekształcona w energię elektryczną, może być gromadzona w akumulatorze elektrochemicznym lub przeznaczona do zasilania rezystorów obciążenia prądnicy elektrycznej. Zgodnie z rys. 2a, może być ona pozyskiwana w czasie $t_l - t_k$, $t_{l+1} - t_{k+1}$ i $t_{l+n} - t_{k+n}$;
- akumulacja nadmiaru energii pierwotnego źródła energii jest praktycznie możliwa, zgodnie z rys. 2a, w czasie $t_k - t_j$ (w którym pojazd porusza się ze stałą prędkością jazdy, a moc oporów ruchu jest mniejsza od mocy pierwotnego źródła energii). Również podczas postoju i w czasie fazy hamowania istnieje możliwość akumulacji energii pierwotnego źródła energii.

Dotyczy to, w przypadku postoju, czasów $t_{i+1} - t_l$, $t_{i+2} - t_{l+1}$ i t_{i+n+1} i $-t_{l+n}$, a w przypadku hamowania czasów $t_l - t_k$, $t_{l+1} - t_{k+1}$ i $t_{l+n} - t_{k+n}$.

Przez s_2 oznaczono zbiór faz (punktów) początkowych ruchu ustalonego, przy czym

$$s_2\{t_j\}: N_2(t_j) > 0 \wedge \ddot{x}(t_j) = 0 \wedge (t_j - \varepsilon) > 0,$$

w którym: N_2 — wartość mocy na kołach jezdnych przy jeździe ze stałą prędkością, ε — dowolna mała liczba dodatnia, $\ddot{x}$ — przyspieszenie.

Jeżeli przez s_3 oznaczono zbiór faz (punktów) początkowych ruchu opóźnionego, przy czym

$$s_3\{t_k\}: N_3(t_k) > 0 \wedge \ddot{x}(t_k) < 0 \wedge \ddot{x}(t_k) > 0 \wedge \ddot{x}(t_{k-\varepsilon}) = 0,$$

w którym N_3 — moc na kołach jezdnych w ruchu opóźnionym, $\dot{x}$ — prędkość jazdy.

Wartość energii wydatkowanej na ruch ze stałą prędkością określa zależność:

$$E_2 = \sum_{\substack{t_j \in s_2 \\ t_k \in s_3}} N_2(\dot{x}, \ddot{x})(t_k - t_j). \tag{2}$$

Jeżeli przez s_4 oznaczono zbiór faz (punktów) początkowych postoju, przy czym

$$s_4\{t_l\}: N_4(t_l) = 0 \wedge \ddot{x}(t_l) = 0 \wedge \dot{x}(t_l) = 0 \wedge \ddot{x}(t_l - \varepsilon) < 0,$$

oraz przyjmie się, że $N_3(\dot{x}, \ddot{x})$ dla każdego $\ddot{x} < 0 \wedge \dot{x} > 0$ jest funkcją mocy na kołach jezdnych w ruchu opóźnionym bez uwzględnienia strat, to całkowita energia ruchu opóźnionego jest równa:

$$E_3 = \sum_{\substack{t_k \in S_3 \\ t_l \in S_4}} \int_{t_k}^{t_l} N_3(\dot{x}, \ddot{x})\mathrm{d}t. \tag{3}$$

Jeżeli przez N_H oznaczono wartość mocy pierwotnego źródła energii, to energię wytworzoną przez to źródło energii podczas postoju pojazdu określa zależność

$$E_5 = N_H \sum_{\substack{t_i \in S_3 \\ t_{i+1} \in S_4}} (t_{i+1} - t_i). \tag{4}$$

Przez s_1 oznaczono zbiór faz (punktów) początkowych ruchu przyspieszonego, przy czym

$$s_1\{t_i\}: N_1(t_i) = 0 \wedge \ddot{x}(t_i) = 0 \wedge \dot{x}(t_i) = 0 \wedge \ddot{x}(t_i + \varepsilon) > 0,$$

N_1 — moc na kołach jezdnych w ruchu przyspieszonym.

Energię wytworzoną przez źródło w czasie ruchu opóźnionego określa zależność:

$$E_6 = N_H \sum_{\substack{t_k \in S_3 \\ t_l \in S_4}} (t_l - t_k). \tag{5}$$

3. Stanowisko badawcze odwzorowujące hybrydowy elektromechaniczny układ napędowy

Stanowisko badawcze [6] zbudowano w układzie, który pozwala odwzorować szeregowy hybrydowy elektromechaniczny napęd pojazdu. Na rysunku 3 przedstawiono schemat ideowo-pomiarowy modelowego stanowiska badawczego z zaznaczeniem elementów składowych i wielkości pomiarowych.

W stanowisku można wyróżnić elementy stanowiące pierwotne źródło energii (silnik elektryczny trójfazowy prądu przemiennego połączony z alternatorem), wtórne źródło energii (baterię akumulatorów elektrochemicznych) i napędowy silnik (silnik elektryczny prądu stałego, szeregowy). Jeżeli przyjmie się oznaczenie elementów i wielkości pomiarowych jak na rys. 3, ich charakterystyka techniczna i podstawowe dane są następujące:

— S — silnik elektryczny trójfazowy, indukcyjny, budowy klatkowej o mocy 4 kW, prędkości obrotowej znamionowej 1470 obr/min, napięciu zasilania 380 / 220 V,

— P — przekładnia pasowa o przełożeniu 2,8,

— A — alternator o mocy 1,5 kW, napięciu 36 V i prędkości obrotowej 4200 obr/min,

— A_k — bateria akumulatorów elektrochemicznych stanowiąca szeregowe połączenie trzech akumulatorów 12 V,

— M — silnik elektryczny prądu stałego szeregowy o mocy 1,6 kW, napięciu 36V, prędkości obrotowej znamionowej 2800 obr /min,

— M_B — masa bezwładnościowa odwzorowująca masę pojazdu,

— G — prądnica elektryczna prądu stałego (samowzbudna bocznikowa lub obcowzbudna) wraz z elementami do regulacji jej obciążenia,

— R_{cg} — sterowany zasilacz obwodu wzbudzenia alternatora.

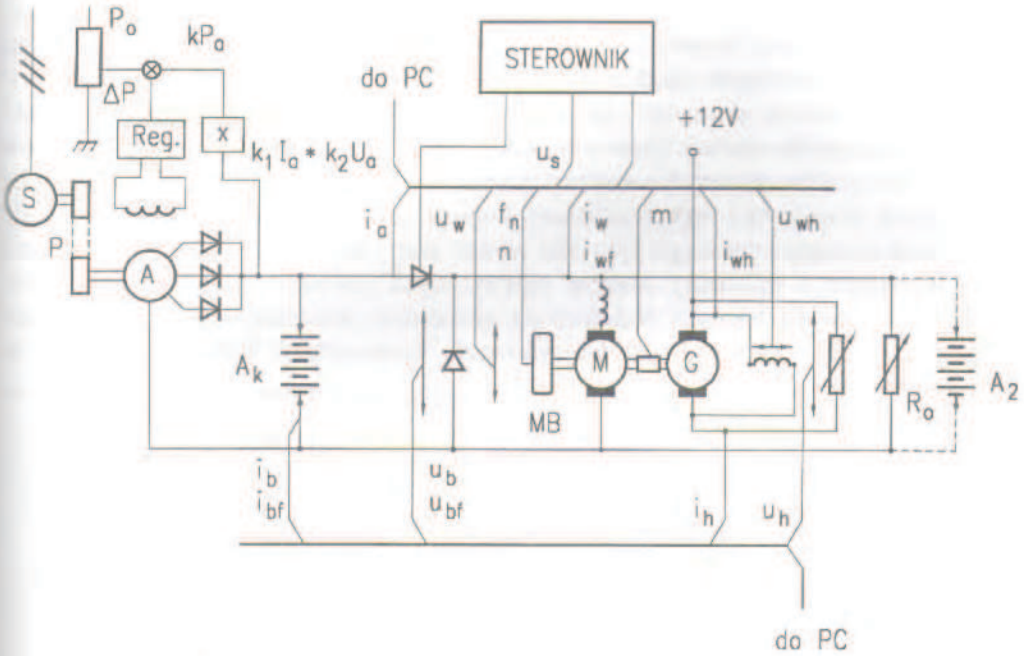
W prezentowanym stanowisku badawczym istnieje możliwość badania hamowania elektrodynamicznego z odzyskiem energii elektrycznej w baterii akumulatorów elektrochemicznych lub przekazywaniem jej do odbiornika rezystancyjnego. Sam proces sterowania (hamowanie z odzyskiem energii) oraz pomiar wielkości fizycznych (elektrycznych i mechanicznych) stanowiska badawczego są możliwe dzięki wykorzystaniu komputera (PC) wyposażonego w odpowiednią kartę pomiarową i program nadzorujący. Pozyskiwana energia w fazie hamowania (napędowy silnik prądu stałego w pracy prądnicowej) jest gromadzona w akumulatorze elektrochemicznym A_2, lub przekazywana do rezystora obciążenia R_0. Nadmiar energii pierwotnego źródła energii (akumulacja energii) jest również gromadzony w baterii akumulatorów A_2 lub przekazywany do rezystora obciążenia R_0. Komputer i urządzenia towarzyszące umożliwiają między innymi:

pomiar i rejestrację prędkości obrotowej napędowego silnika elektrycznego,

pomiar i rejestrację prądów i napięć wybranych elementów stanowiska (jest możliwy pomiar i rejestracja szesnastu różnych wielkości fizycznych).

Ponadto karta i program nadzorujący, dają możliwość zaprogramowania czasu trwania poszczególnych faz badanego cyklu jazdy, rejestracji fazy hamowania, zaprogramowanie wartości początkowej prędkości obrotowej masy bezwładnościowej w fazie hamowania itp. Do komputerowych pomiarów napięć i prądów wykorzystano zainstalowane w stanowisku badawczym przetworniki pomiarowe: do pomiaru napięć typu LV 25-P, a do pomiaru prądów typu LASO-P oba firmy LEM. Prędkość obrotową mierzono za pomocą miniaturowego przetwornika obrotowo-impulsowego typu E21MPL. Alternator zainstalowany w stanowisku badawczym pracował w układzie obcowzbudnym z automatycznie sterowanymi prądem i napięciem w obwodzie wzbudzenia. Z obwodu wyjściowego alternatora przekazywane są sygnały: prądowy $k_1 I_a$

i napięciowy k_2U_a, które sterują układem mnożącym x (rys.3). Napięcie wyjściowe tego układu jest więc proporcjonalne do wartości chwilowej mocy obciążenia alternatora kP_a. Sygnał ten jest porównywany w układzie komparatora z wartością zadaną mocy P_o. Sygnał błędu, tj. różnicy $\Delta P = kP_a - P_o$ w sterowniku „Reg" steruje wartościami prądu i napięcia wzbudzenia alternatora tak, aby ten pracował wartością stałą mocy P_a proporcjonalną do wartości zadanej P_o.



Rys. 3. Schemat ideowo-pomiarowy modelowego stanowiska badawczego.
Fig. 3. Schematic diagram of experimental model stand.

Na rysunku 3 oznaczono:

— tor napięciowy odwzorowujący zadany cykl jazdy — u_s,

— tor pomiaru prędkości obrotowej i tor organizacji impulsów podstawy czasu — n, f_n,

— tor pomiaru momentu obrotowego silnika napędowego — m,

— tory pomiaru wartości chwilowych prądów (i_a — prąd alternatora, i_b — prąd baterii akumulatorów, i_w-prąd wirnika napędowego silnika elektrycznego, i_h — prąd obciążenia prądnicy elektrycznej, i_{wh} — prąd wzbudzenia prądnicy elektrycznej)

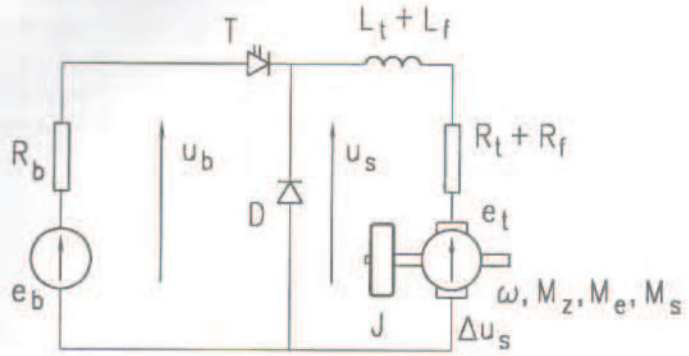
— tor pomiaru wartości chwilowych napięć ($u_b = u_a$ — napięcie baterii akumulatorów równe napięciu alternatora, u_w — napięcie na zaciskach wirnika napędowego silnika elektrycznego, u_h — napięcie na zaciskach prądnicy elektrycznej prądu stałego, u_{wh} — napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia prądnicy),

— w celu ułatwienia obserwacji na ekranie monitora, wartości i_w, i_b oraz u_b poddano wstępnej filtracji (dlatego na rys. 3 występuje indeks f).

Na prezentowanym modelowym stanowisku przeprowadzono badania pozyskiwania energii hamowania, zarówno w przypadku, kiedy obciążeniem prądnicy elektrycznej była bateria akumulatorów elektrochemicznych jak i rezystor obciążenia (hamowania).

4. Modele matematyczne elementów napędowych i układu regulacji stanowiska badawczego

Analizując schemat ideowo pomiarowy stanowiska badawczego przedstawiony na rys. 3 można stwierdzić, że silnik elektryczny prądu stałego, samowzbudny, szeregowy jest zasilany z baterii akumulatorów elektrochemicznych przez przekształtnik impulsowy *T*. Odpowiedni schemat ideowy tej części stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4. Do analizy stanów dynamicznych maszyn elektrycznych zastosowano zgodnie z [7] metodę obwodową z wykorzystaniem drugiego prawa Kirchhoffa. W tym przypadku dla modelu matematycznego dynamiki silnika szeregowego prądu stałego podawane są w literaturze z dziedziny maszyn elektrycznych równania napięć i momentów obrotowych z uwzględnieniem dodatkowych elementów przedstawionych na w/w schemacie (rys.4).W układach elektromaszynowych zasilanych z baterii akumulatorów



Rys. 4. Schemat ideowy maszyny elektrycznej prądu stałego, samowzbudnej, szeregowej w konfiguracji modelowego stanowiska badawczego dla fazy rozruchu: (e_t — wartość chwilowa siły elektromotorycznej twornika maszyny, R_t+R_f — rezystancja uzwojenia twornika i wzbudzenia, L_t+L_f — indukcyjność uzwojenia twornika i wzbudzenia, T — przekształtnik impulsowy, D — dioda prostownikowa, R_b — rezystancja wewnętrzna baterii akumulatorów, e_b — wartość chwilowa siły elektromotorycznej baterii akumulatorów, u_b — wartość chwilowa napięcia baterii akumulatorów, ω — wartość chwilowa prędkości kątowej wirnika (twornika), M_z, M_e, M_s — momenty: obrotowy zewnętrzny, elektromagnetyczny, strat w układzie, J — moment bezwładności, u_s — wartość chwilowa napięcia na zaciskach maszyny, Δu_s — spadek napięcia na szczotkach maszyny elektrycznej.

Fig. 4. Schematic diagram of determined current series self-excited machine at model experimental stand in start-up phase (e_t — actual value of electromotive force of machine armature, R_t+R_f — armature and exciting winding resistance, L_t+L_f — armature and exciting winding induction, T — pulsce converter, D — rectifying diode, R_b — battery internal resistance, e_b — electromotive force actual value of electrochemical battery, u_b — battery voltage actual value, ω — armature actual speed value, M_z, M_e, M_s — moments: external, electromagnetic, system losses, J — inertia moment, u_s — actual value of machine terminal voltage, Δu_s — voltage drop at brushes).

elektrochemicznych należy liczyć się z tym, że jej napięcie maleje wraz ze wzrostem obciążenia. W tym przypadku uwzględnia się również spadek napięcia na szczotkach. Silniki elektryczne prądu stałego, samowzbudne, szeregowe, są maszynami elektrycznymi bardzo wykorzystanymi pod względem elektromagnetycznym, mają więc nasycony obwód magnetyczny. Z tego względu w równaniu napięć nie przyjmuje się stałych wartości indukcyjności, natomiast operuje się strumieniami sprzężonymi. Po uwzględnieniu powyższych osobliwości układu napędowego równania przyjmują następującą postać:

$$
\begin{aligned}
& e_t - \left(N_t \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + N_f \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t}\right) \frac{di_t}{dt} - (R_t + R_f) i_t - \Delta u_S(i_t) - \Delta u_T(i_t) = u_b, \\
& e_t = c\phi(i_t)\omega(t), \\
& u_b = e_b(i_t, t) - R_b i_b, \\
& J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_S - M_Z, \\
& M_e = c\phi(i_t) i_t.
\end{aligned}
\tag{6}
$$

w których: ϕ_t, ϕ_f — strumień magnetyczny uzwojenia twornika i uzwojenia wzbudzenia, i_t — prąd twornika, i_b — prąd akumulatora, t — czas, Δu_T — spadek napięcia na przewodzącym zaworze elektrycznym przekształtnika, N_t, N_f — liczba zwojów uzwojenia twornika i uzwojenia wzbudzenia.

Układ automatycznej regulacji przekształtnika T (rys. 4) umożliwia impulsową regulację wartości średniej napięcia na zaciskach napędowego silnika elektrycznego. Napięcie wyjściowe regulatora (przekształtnika) zależy od współczynnika wypełnienia cyklu impulsowania α.

$$\alpha = \frac{t_1}{T_1} \tag{7}$$

przy czym t_1 — czas przewodzenia zaworu elektrycznego przekształtnika, T_1 — okres impulsowania.

W przypadku, gdy układ automatycznej regulacji przekształtnika stabilizuje prąd i_t na określonym poziomie, prąd i_b określa zależność:

$$i_b = \alpha i_t, \tag{8}$$

w której α zmienia się od $\alpha_{\min}$ do 1.

Do modelowania matematycznego pracy maszyny elektrycznej jest konieczne zastosowanie dwóch układów równań zależnych od stanu włączenia i wyłączenia przekształtnika. Stany te zdefiniowane są funkcją przełączającą:

$$f_p(i_t) = 1 \quad \text{dla} \quad i_t \le i_A - 0{,}5\,\Delta i_t, \tag{9}$$

$$f_p(i_t) = 0 \quad \text{dla} \quad i_t \ge i_A + 0{,}5\,\Delta i_t, \tag{10}$$

w której Δi_t — założone tętnienie prądu twornika, i_A — wartość zadana prądu twornika.

Stan włączenia przekształtnika ($f_p = 1$)

Równania opisujące maszynę elektryczną są następujące:

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{1}{N_t \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + N_f \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t}} (c\phi(i_t)\omega - (R_t + R_f) i_t - \Delta u_T - \Delta u_S - e_b + R_b i_b),$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(c\phi(i_t) i_t - M_S - M_Z). \tag{11}$$

Stan wyłączenia przekształtnika ($f_p = O$)

Równania opisujące maszynę są następujące:

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{1}{N_t \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + N_f \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t}} (c\phi(i_t)\omega - (R_t + R_f) i_t - \Delta u_D),$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(c\phi(i_t) i_t - M_S - M_Z), \tag{12}$$

przy czym Δ_{UD} — spadek napięcia na diodzie D.

Schemat ideowy maszyny elektrycznej prądu stałego, samowzbudnej szeregowej w konfiguracji stanowiska badawczego dla fazy hamowania różni się od schematu ideowego z rys. 4 tym, że:

— w miejsce przekształtnika T zainstalowana jest dioda prostownicza przewodząca prąd do odbiorników energii hamowania,

— w miejsce diody D zainstalowany jest sterowany zawór elektryczny stanowiący tyrystor powodujący zwarcie maszyny i przepływ prądu w obwodzie twornika — jest to faza wzbudzenia maszyny elektrycznej w pracy prądnicowej.

Układ równań opisujący maszynę w pracy prądnicowej dla $f_p = 1$ jest następujący:

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{1}{N_t \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + N_f \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t}} (c\phi(i_t)\omega - (R_t + R_f) i_t - \Delta_{U_s} - \Delta_{U_D}),$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(c\phi(i_t) i_t - M_S - M_Z). \tag{13}$$

Dla stanu wyłączenia przekształtnika $f_p = O$, układ opisują zależności :

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{1}{N_t \frac{\partial \phi_t}{\partial i_t} + N_f \frac{\partial \phi_f}{\partial i_t}} (c\phi(i_t)\omega - (R_t + R_f) i_t - 2\Delta_{U_s} - \Delta_{U_D} - e_b - R_b i_b),$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(c\phi(i_t) i_t - M_S - M_Z). \tag{14}$$

Dla hamowania przy przekazywaniu energii do rezystora obciążenia $e_b = 0$, $R_b = R$

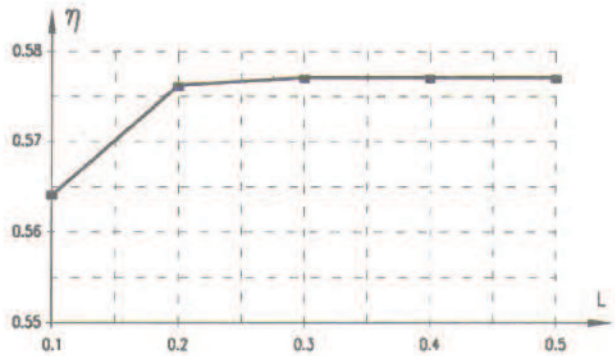
5. Wyniki badań symulacyjnych energii hamowania pojazdu

Badania symulacyjne energii pozyskiwanej dotyczą akumulacji energii hamowania w baterii akumulatorów elektrochemicznym 45 A·h i przekazywaniu jej do rezystora obciążenia przy zmianie prędkości obrotowej prądnicy elektrycznej prądu stałego, szeregowej, od 2800 obr/min.

Badania przeprowadzono dla baterii akumulatorów o stopniu wyładowania L równym 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 i 0,5, i rezystancji obciążenia w granicach od 0,1 do 0,4 Ω.

Tabela 1. Wyniki badań symulacyjnych energii hamowania przekazywanej do akumulatora elektrochemicznego w zależności od prędkości obrotowej prądnicy i stopnia wyładowania akumulatora 45 A·h.
Table 1. Simulation experiment results of braking energy transmitted to electrochemical battery in relation to generator rotation speed and discharge factor of 45 A·h battery.

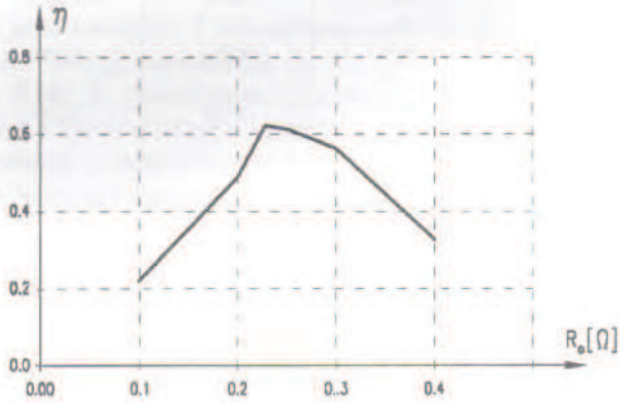
Zmiana prędkości obrotowej obr/min	Czas prowadzenia badań s	Zmiana wartości energii kJ	Wartość energii odzyskane kJ	Sprawność odzysku energii	Stopień wyładowania akumulatora
2800 336	68	86,0 1,2	47,5	0,560	0,1
2800 333	68	86,0 1,3	47,5	0,561	0,2
2800 394	68	86,0 1,7	47,6	0,565	0,3
2800 396	68	86,0 1,7	47,6	0,565	0,4
2800 394	68	86,0 1,7	47,6	0,565	0,5



Rys. 5. Wykres zależności sprawności odzysku energii od stopnia wyładowania baterii akumulatorów 45 A·h przy zmianie prędkości obrotowej od 2800 obr/min.
Fig. 5. The graph of energy recuperation efficiency dependence on 45 A·h battery discharge factor corresponding to rotation speed variations starting at 2800 rpm.

Tabela 2. Wyniki badań symulacyjnych energii hamowania przekazywanej do rezystorów w zależności od prędkości obrotowej prądnicy i wartości rezystancji obciążenia.
Table 2. Simulation experiment results of braking energy transmitted to resistors in relation to rotation speed 2800 rpm.

Zmiana prędkości obrotowej obr/min	Czas badania prądu, napięcia, mocy i energii s	Zmiana wartości energii kJ	Energia odzyskana kJ	Sprawność odzysku energii	Rezystancja obciążenia Ω
2800	48	86,0	24,3	0,319	0,40
550		3,6			
2800	49	86,0	34,5	0,450	0,35
540		3,1			
2800	56	86,0	43,2	0,560	0,30
489		2,9			
2800	62	86,0	48,2	0620	0,25
395		2,9			
2800	37	86,0	49,3	0,630	0,23
342		2,2			
2800	32	86,0	38,8	0,490	0,20
330		1,6			
2800	18	86,0	17,5	0,220	0,10
263		0,5			



Rys. 6. Wykres zależności sprawności odzysku energii od rezystancji obciążenia (n = 2800 obr/min).
Fig. 6. The graph of energy recuperation efficiency dependence on load element resistance (n = 2800 rpm).

W Tabeli 1 przedstawiono wyniki badań przy akumulacji energii w baterii akumulatorów, a w Tabeli 2 wyniki badań przy przekazywaniu energii do rezystorów obciążenia. Natomiast rysunek 5 przedstawia wykres sprawności pozyskiwania energii w zależności od stopnia wyładowania baterii akumulatorów, a rys. 6, wykres sprawności przekazywania energii do rezystorów obciążenia w zależności od wartości ich rezystancji.

6. Weryfikacja badań symulacyjnych energii hamowania na stanowisku badawczym

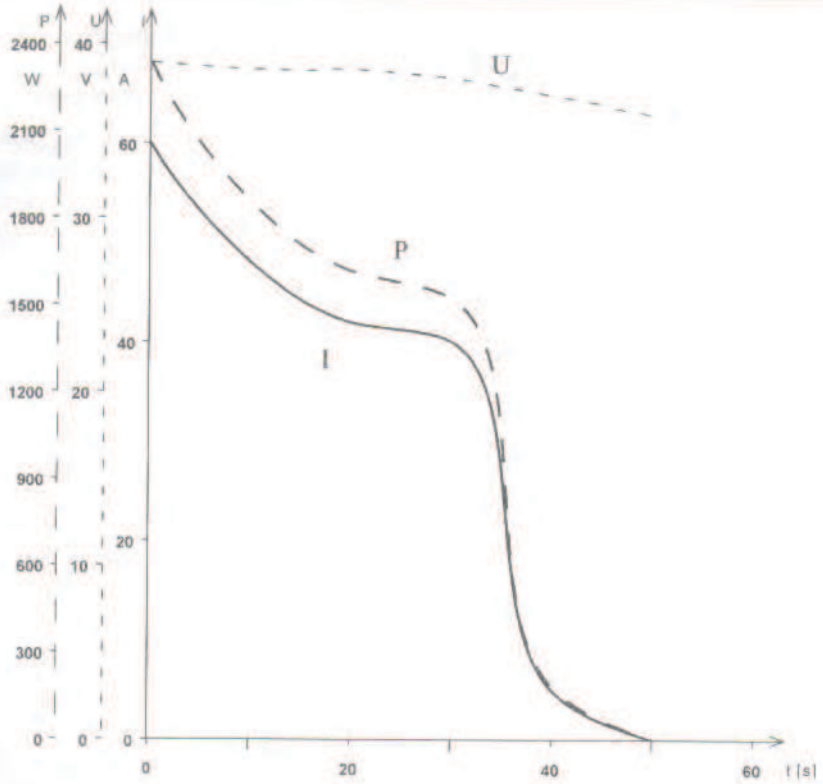
Badania symulacyjne zweryfikowano badaniami rzeczywistymi na stanowisku badawczym. W Tabeli 3 przedstawiono wyniki badań stanowiskowych (prądów, napięć, mocy i czasu) przy przekazywaniu energii do baterii akumulatorów, a w Tabeli 4 wyniki tych samych badań przy przekazywaniu energii do rezystorów obciążenia. Natomiast na rys. 7 przedstawiono zależności tych wielkości fizycznych w funkcji czasu przy przekazywaniu energii do baterii akumulatorów, a na rys. 8 zależność tych wielkości fizycznych w funkcji czasu przy przekazywaniu energii do rezystora obciążenia.

Tabela 3. Wyniki badań prądów, napięć, mocy i czasu, prądnicy elektrycznej szeregowej prądu stałego w trakcie hamowania masy bezwładnościowej stanowiska przy przekazywaniu energii do baterii akumulatorów elektrochemicznych (n = 2800 obr/min, akumulator 45 A·h).
Table 3. Test results of currents, voltages, power and time of series determined current generator during inertia mass braking at experimental stand for energy transmission to electrochemical battery set (n = 2800 rpm, battery capacity 45 A·h).

t [s]	I [A]	U [V]	P [W]	ΣE [kJ]
0	60	39,0	2340	
10	48	38,6	1853	
20	42	38,5	1617	
30	40	38,0	1520	44,5
40	5,0	37,0	185	
50	0	36,0	0	

Tabela 4. Wyniki badań prądów napięć, mocy i czasu, prądnicy elektrycznej szeregowej prądu stałego w trakcie hamowania masy bezwładnościowej stanowiska przy przekazywaniu energii do rezystora (n = 2800 obr/min, R = 0,23 Ω)
Table 4. Tests results of currents, voltages, power and time of series determined current generator during inertia mass braking at experimental stand for energy transmission to electrochemical battery set (n = 2800 rpm, R=0.23 Ω)

t [s]	I [A]	U [V]	P [W]	ΣE [kJ]
0	60	38,6	2316	
10	50	31,0	1600	
20	39	25,0	975	
30	23	17,5	402	
40	19	15,0	285	45,4
50	10	10,0	100	
60	5,5	4,5	25	
70	0	0	0	

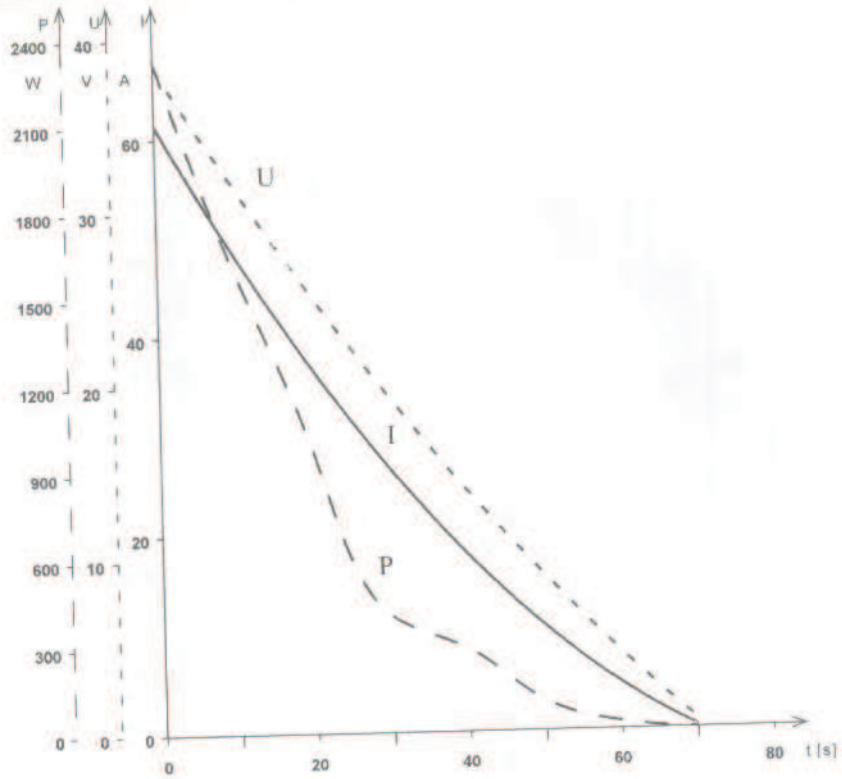


Rys. 7. Przebiegi prądu, napięcia i mocy w czasie, prądnicy elektrycznej szeregowej prądu stałego w trakcie hamowania przy przekazywaniu energii do baterii akumulatorów elektrochemicznych (n = 2800 obr/min akumulatory 45 A · h).

Fig. 7. The graph of current, voltage and power against time of determined current series generator at braking for energy supply to a set of electrochemical batteries (n = 2800 rpm, 45 A · h batteries).

7. Badania akumulacji energii w przypadku nadmiaru mocy pierwotnego źródła energii ponad moc oporów ruchu

W fazie jazdy pojazdu z ustaloną prędkością, w fazie hamowania i postoju jest możliwa akumulacja energii pierwotnego źródła energii układu hybrydowego. Silnik spalinowy tego źródła energii (na stanowisku silnik elektryczny, indukcyjny trójfazowy) napędza prądnicę elektryczną (alternator). Jeżeli moc silnika jest większa od aktualnej wartości mocy oporów ruchu energia alternatora może być akumulowana. Biorąc za podstawę schemat ideowo-pomiarowy (rys. 3) stanowiska badawczego dokonano badań eksperymentalnych. Alternator pracujący w układzie obcowzbudnym może uzyskiwać stałą wartość mocy P_a proporcjonalną do procentowej wartości zadanej P_o. Techniczne możliwości regulacji tej mocy dotyczą nastawienia wartości P_o (potencjometrem poziomu wyzwalania regulując od 0 do 100%, można regulować moc oddawaną alternatora w stosunku do jego mocy znamionowej). Regulacja ta jest możliwa niezależnie od przyjętej wartości napięcia na zaciskach maszyny elektrycznej U i napięcia wzbudzenia U_{wa}.



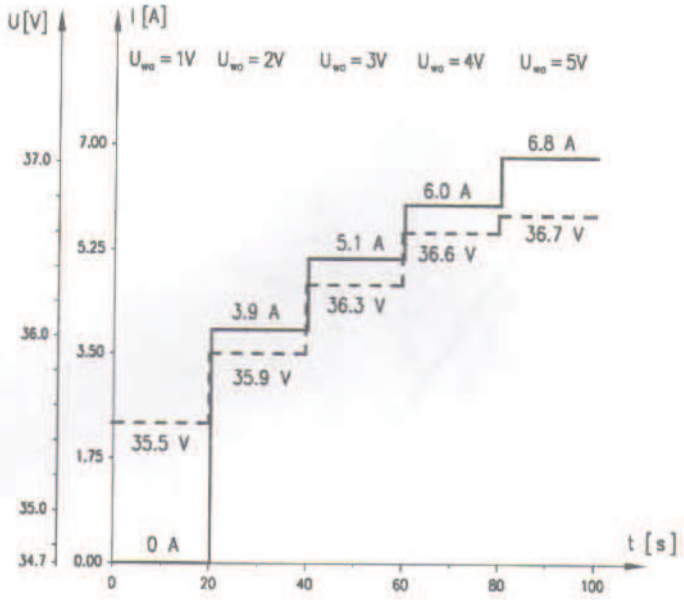
Rys. 8. Przebiegi prądu, napięcia i mocy w czasie, prądnicy elektrycznej szeregowej prądu stałego w trakcie hamowania przy przekazywaniu energii do rezystora obciążenia (n = 2800 obr/min R = 0,23 Ω).
Fig. 8. The graph of current, voltage and power against time of determined current series generator at braking for energy transmission to resistor (n = 2800 rpm, R = 0.23 Ω).

Dla poszczególnych eksperymentów nastawiono następujące wartości P_o i U_{wa}:

— P_o = 25%, U_{wa} = 1V, 2V, 3V, 4V, 5V,
— P_o = 50%, U_{wa} = 1V, 2V, 3V, 4V, 5V,
— P_o = 75%, U_{wa} = 1V, 2V, 3V, 4V,
— P_o = 100%, U_{wa} = 1V, 2V, 3V.

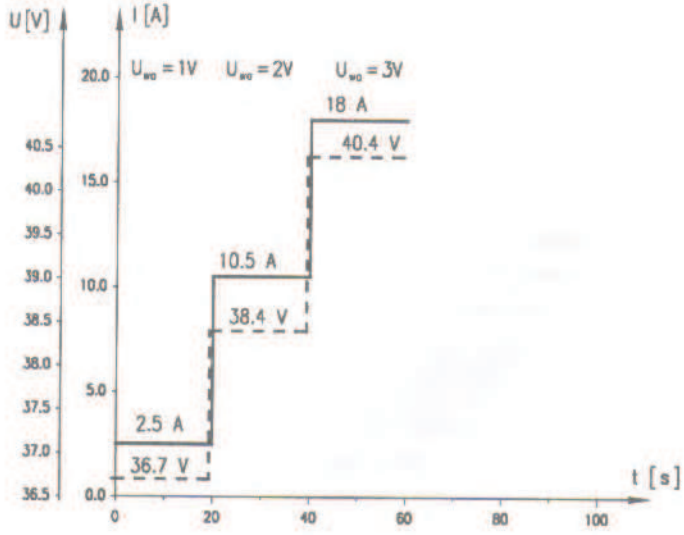
Energię w trakcie eksperymentu akumulowano w baterii składającej się z trzech akumulatorów o pojemności 45 A · h połączonych szeregowo. Napięcie baterii akumulatorów było równe 36V. Przykładowo, na rys. 9 przedstawiono charakterystyki zmian wartości średnich prądu i napięcia alternatora w czasie, dla P_o = 25%, U_{wa} = 1V, 2V, 3V, 4V, 5V. Natomiast, na rys. 10 przedstawiono charakterystyki zmian średnich wartości prądu i napięcia alternatora w czasie dla P_o = 100%, U_{wa} = 1V, 2V i 3V.

W Tabeli 5 przedstawiono zestawienie wyników dla wszystkich przeprowadzonych badań eksperymentalnych.



Rys. 9 Zależność wartości średnich prądów i napięć alternatora od czasu dla P_o = 25% i U_{wa} = 1V, 2V, 3V, 4V, 5V.

Fig. 9. Alternator mean current and voltage versus time for P_o = 25 and U_{wa} = 1V, 2V, 3V, 4V, 5V.



Rys. 10 Zależność wartości średnich prądów i napięć alternatora od czasu, dla P_o = 100% i U_{wa} = 1V, 2V, 3V.

Fig. 10. Alternator mean current and voltage versus time for P_o = 100 and U_{wa} = 1V, 2V, 3V.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych akumulacji nadwyżki mocy pierwotnego źródła energii, gdy jej wartość jest większa od wartości chwilowych oporów ruchu.
Table 5. Specification of experiment results of accumulation of primary source surplus power when its value exceeds actual motion resistance power.

U_{wa}	1V	2V	3V	4V	5V	
$P_0 = 25\%$	U[V] I[A] P[W]	35,5 0 0	35,9 3,9 140	36,3 5,1 185	36,6 6,0 220	36,7 6,8 249
$P_0 = 50\%$	U[V] I[A] P[W]	36,0 1,0 36,0	38,0 10,0 380	38,6 11,5 444	39,0 13,0 507	39,2 13,9 545
$P_0 = 75\%$	U[V] I[A] P[W]	36,6 2,5 91,5	38,5 10,5 405	40,0 17,5 700	40,5 19	
$P_0 = 100\%$	U[V] I[A] P[W]	36,7 2,5 92	438,4 10,5 403	40,4 18,0 727		

9. Uwagi końcowe

W przypadku pozyskiwania energii w fazach hamowania pojazdu samochodowego o napędzie hybrydowym, jest możliwość jej gromadzenia w akumulatorach elektrochemicznych lub jej przekazywania do rezystorów obciążenia.

W publikacji udowodniono to przedstawiając:

— wyniki badań symulacyjnych energii hamowania pojazdu,

— weryfikację badań symulacyjnych w warunkach stanowiska badawczego.

W przypadku nadwyżki mocy pierwotnego źródła energii układu hybrydowego nad wartością rzeczywistą (aktualną) mocy oporów ruchu występującej w fazach: jazdy ze stałą prędkością, opóźnienia i postoju, również istnieje możliwość akumulacji energii w baterii akumulatorów elektrochemicznych lub jej przekazywania do rezystorów obciążenia. Praktyczne możliwości akumulacji tej energii omówiono na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na modelowym stanowisku badawczym. W wyniku omówionych właściwości, pojazd samochodowy o napędzie hybrydowym elektromechanicznym może być zaliczony do energooszczędnych.

Literatura

[1.] Ocioszyński J.: *Oszczędność energii w pojazdach z napędem elektrycznym i hybrydowym elektromechanicznym*, WPW, Prace Naukowe — Mechanika 96/1986.

[2.] Ocioszyński J.: *Ekologiczny pojazd samochodowy*, Problemy Eksploatacji, 2/1997, Kwartalnik Naukowy Instytutu Technologii Eksploatacji.

[3.] Collia M.J.: *Electric and hybrid vehicles*, Energy Technology Review Nr 44, New Jersey USA 1979.

[4.] Prace I Konferencji pt. „Niekonwencjonalne napędy pojazdów i maszyn roboczych", Warszawa 1994.
[5.] Ocioszyński J.: *Elektroenergetyka hybrydowych elektromechanicznych układów napędowych pojazdów*, WPW Prace Naukowe — Mechanika 76/1981.
[6.] Majewski P., Ocioszyński J.: *Stanowisko laboratoryjne — badanie własności hybrydowego układu napędowego*, praca własna, Warszawa 1984, Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich Politechniki Warszawskiej.
[7.] Koziej E.: *Maszyny elektryczne pojazdów samochodowych*, WNT, Warszawa 1986
[8.] Chmielewski J., Bramson E., Majewski P., Ocioszyński J.: *System automatycznej rejestracji parametrów hybrydowego elektrycznego układu napędowego pojazdu*. I Konferencja nt. Niekonwencjonalne napędy pojazdów i maszyn roboczych, Warszawa 1994

Theoretical and experimental analysis of drive cycles energy states of hybrid electromechanical vehicle drive systems

Summary

The discussion on theoretical and experimental possibilities to recuperate energy is presented in the paper on the basis of series hybrid electromechanical driving system analysis. The model stand, built for the purpose of this work, enable to study the principles of energy recuperation and control system construction (related to the primary energy source), that decide on energy accumulation in the case of combustion engine surplus power over the actual power of motion resistance. The mathematical model of driving engine and control system, in relation to the experimental stand, enabled to do simulate tests and to study on vehicle braking energy transmitted to electrochemical batteries and load resistors. It was also possible to validate the results under condition of the model stand.