

Wpływ odbiorników energii elektrycznej pojazdu na parametry silnika spalinowego

**MARIAN CICHY
ZBIGNIEW KNEBA
SŁAWOMIR MAKOWSKI
JACEK KROPIWNICKI**

Politechnika Gdańska
Katedra Silników Spalinowych i Sprężarek

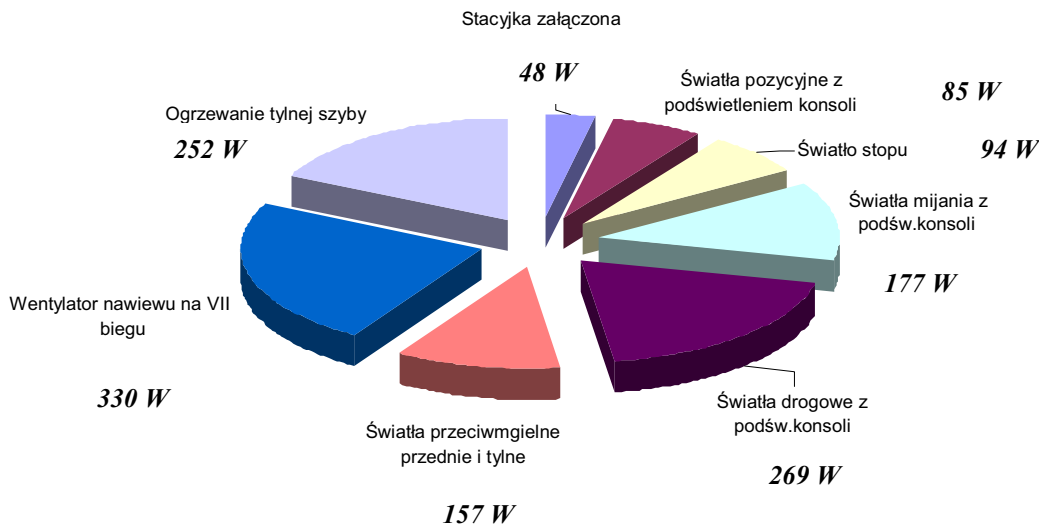
W artykule przedstawiono model systemu energetycznego pojazdu napędzanego silnikiem spalinowym w postaci grafów wiązań (GW). W modelu tym uwzględniono szczególnie część elektryczną systemu składającą się z generatora, akumulatora elektrochemicznego i odbiorników energii elektrycznej. Podano zależności na podstawowe parametry systemu energetycznego w konwencji GW. W oparciu o przedstawioną w pracy [11] wielowymiarową charakterystykę silnika spalinowego podano procedurę wyznaczania wpływu odbiorników energii elektrycznej na parametry silnika spalinowego. Przedstawiono przykłady numeryczne określania tych parametrów.

1. Wprowadzenie

Obserwując tendencje rozwojowe pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi można zauważyć wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Przewiduje się, że napięcie sieci elektrycznej pojazdu zostanie zwiększone do 42V [1,2]. Już w samym silniku spalinowym zastosowanie nowej generacji układów chłodzenia wymaga elektrycznego napędu pompy cieczy chłodzącej o mocy rzędu 500 W [3]. Proponowany jest elektromagnetyczny napęd zaworów rozrządu [4], co wiąże się również ze zwiększeniem zapotrzebowania na energię elektryczną o około 500 – 900 W [5]. W instalacji elektrycznej pojazdu coraz powszechniej stosowane są układy klimatyzacji, elektryczne napędy otwierania szyb i napędy do zmiany położenia siedzeń samochodowych. Rodzi się pytanie: jak zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną wpłynie na zużycie paliwa i emisję składników toksycznych?

Dla stwierdzenia, jak duże strumienie energii płyną do poszczególnych odbiorników przeprowadzono pomiary tych strumieni w samochodzie osobowym z silnikiem o zapłonie iskrowym o objętości skokowej 2 dm³ [6]. Na rysunku 1 przedstawiono pomierzone moce odbiorników energii elektrycznej najczęściej używanych w czasie

jazdy na tle mocy całkowitej. Suma pokazanych mocy wynosi 1413 W. Kierowca nie ma pełnej dowolności włączaniu odbiorników. Sterowniki elektroniczne włączanych urządzeń są w stanie ograniczać pobór prądu do odbiorników tak, aby nie przekraczał on dopuszczalnego dla instalacji o określonym bilansie energii. Bilans mocy warunkują maksymalna moc alternatora i pojemność akumulatora, a w niektórych układach sterowania nawet chwilowe obciążenie silnika spalinowego. W badanym samochodzie ograniczenie poboru mocy ciągłej, przez odbiorniki energii elektrycznej, wynosiło około 800 W. Problem nieznanego algorytmu sterowania najbardziej dotyczy układów klimatyzacji automatycznej, w której na podstawie wielu pomiarów opracowany jest sygnał o potrzebnej wydajności chłodniczej. Częściowym rozwiązaniem opisywanych problemów jest badanie samochodów z zachowaniem powtarzalnych warunków otoczenia na hamowni.

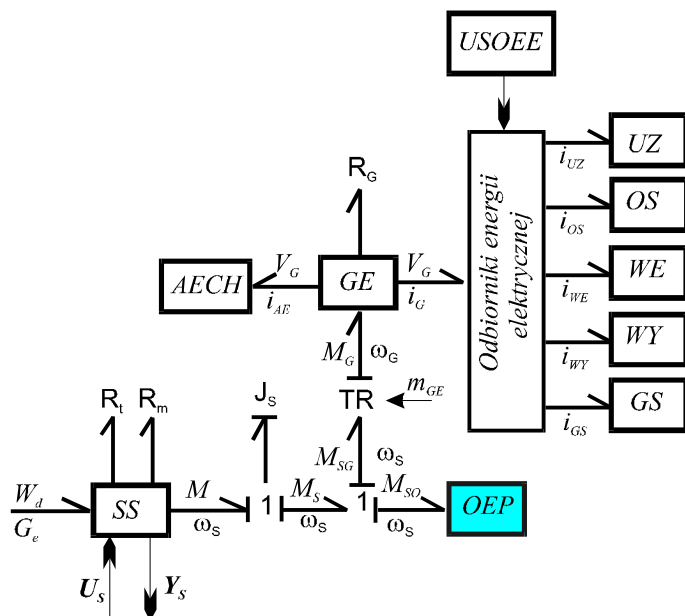


Rys. 1. Odbiorniki elektryczne włączane najczęściej w czasie jazdy
Fig.1. Power consumers turning on while driving most often

W niniejszej pracy do analizy wpływu załączonych odbiorników na eksploatacyjne parametry samochodu zastosowany będzie model w postaci grafów wiązań (GW) [7, 8]. Podstawową cechą tego sposobu modelowania jest jednolite podejście do modelowania procesów energetycznych o różnej naturze fizycznej. Procesy energetyczne zachodzące w elementach mechanicznych (przekładnia, akumulacja energii kinetycznej) i elektrycznych (generator, silnik elektryczny, odbiornik rezystancyjny) modelowane są przy użyciu tych samych podstaw teoretycznych [8]. Dalszą cechą tej metody modelowania jest, nie pokazana w tej pracy, możliwość analizy dynamiki systemu energetycznego przy zastosowaniu równań stanu wynikających z modelu GW [8].

2. Model pojazdu z silnikiem spalinowym w postaci GW

Na rysunku 2 przedstawiony jest model w postaci GW pojazdu napędzanego silnikiem spalinowym z uwzględnieniem elementów elektrycznych, takich jak: generator elektryczny, akumulator elektrochemiczny i odbiorniki energii elektrycznej. Analizę wpływu tych elementów na parametry silnika wyznaczać się będzie dla określonych warunków eksploatacji. W tym celu rozwinięto model pojazdu w postaci GW. Model ten pokazano na rysunku 3.

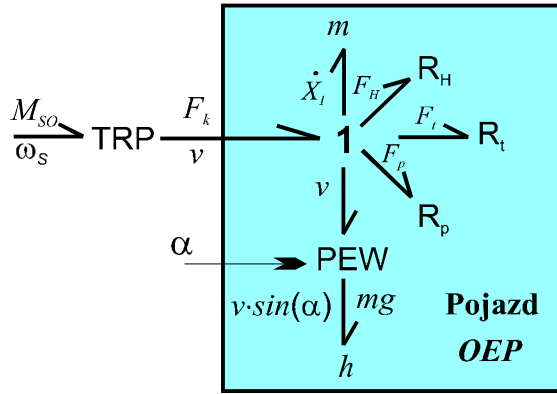


Rys. 2. Model GW pojazdu napędzanego silnikiem spalinowym:

SS – silnik spalinowy; OEP – pojazd jako odbiornik energii; GE – generator elektryczny; AECH – akumulator elektrochemiczny; UZ – układ zapłonowy; OS – oświetlenie; WE – wentylacja, klimatyzacja; WY – wycieraczki; GS – ogrzewanie szyb; USOEE – układ sterowania odbiornikami energii elektrycznej

Fig. 2. Bond Graph model of a vehicle powered by combustion engine:

SS - combustion engine; OEP - vehicle as a power consumer; GE generator; AECH - battery; UZ - ignition system; OS - lighting; WE - fan, AC; WY - windscreen wiper, GS - window heating; USOEE - control system for electrical energy consumers



Rys. 3. Rozwinięty model pojazdu jako odbiornika energii

TRP – układ napędowy pojazdu traktowany jako transformator energii, m – akumulator energii kinetycznej w postaci zredukowanej masy, R_H – opory hamowania, R_t – opory toczenia, R_p – opory powietrza, **PEW** – modulowany przetwornik energii, h – akumulator energii potencjalnej w postaci położenia na drodze

Fig. 3. Full model of a vehicle as an energy consumer

TRP – ignition system treated as an energy transducer, m – kinetic energy storage – reduced mass, R_H – braking resistance, R_t – rolling resistance R_p – air resistance, PEW – modulated energy transducer, potential energy storage as road high

3. Podstawowe parametry systemu energetycznego w konwencji GW

W konwencji GW każdy przepływ energii (przetwarzanie, akumulacja, rozpraszanie), niezależnie od jego fizycznej postaci, określony jest dwoma parametrami: uogólnionym potencjałem „ e ” i uogólnionym przepływem „ f ” [7, 8]. Przy przytaczanych parametrach podano jednostki, podkreślając tym samym istotność ich stosowania przy eksperymentach symulacyjnych z użyciem modeli matematycznych w postaci równań stanu [8].

Moc, czyli strumień energii określona jest w konwencji GW zależnością:

$$N = ef [W]. \quad (1)$$

Ilość przekazanej energii wyznacza związek:

$$E = \int efdt [J]. \quad (2)$$

W przypadku modelu silnika przedstawionego na rysunku 1 uogólnionymi potencjałami e są:

- Wartość opałowa paliwa W_d [J/kg],
- Moment obrotowy M_s [Nm],
- Napięcie sieci elektrycznej V [V].

Uogólnionymi przepływami f są:

- sekundowe zużycie paliwa G_e [kg/s],
- prędkość kątowna wału silnika ω_s [rad/s],
- prąd i [A].

Głównymi składowymi wektora parametrów wyjściowych Y_s (rys. 2 i zależność (3))

są:

- * moc silnika $N_e = M_s \cdot \omega_s$,
- * dawka paliwa na cykl m_c ,
- * sekundowe zużycie paliwa G_e ,
- * jednostkowe zużycie paliwa $g_e = G_e / M_s \cdot \omega_s$,
- * sprawność ogólna silnika $\eta_o = M_s \cdot \omega / G_e \cdot W_d$,
- * położenie organu sterowania silnikiem $U_s \in [0,1]$,
- * kąt wyprzedzenia zapłonu α_z ,
- * jednostkowa emisja składników toksycznych.

Określone w taki sposób parametry silnika wykorzystywane są do tworzenia modelu matematycznego całego systemu energetycznego [8] w postaci równań stanu:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f_1(X, U), \\ Y &= f_2(X, U). \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

X – wektor zmiennych stanu,

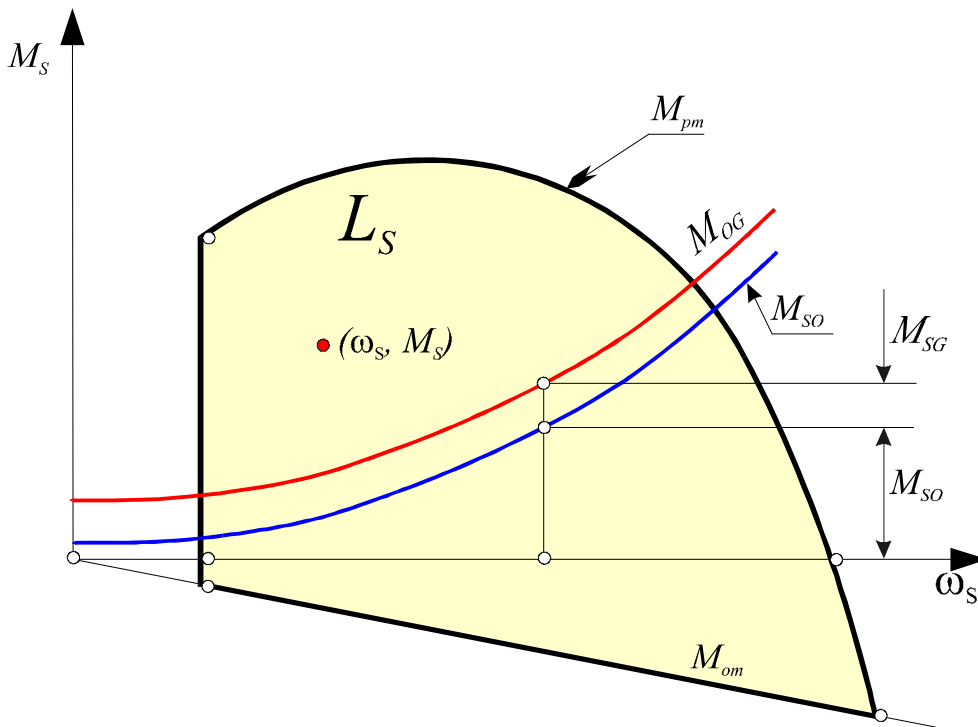
U – wektor sterowań,

Y – wektor parametrów wyjściowych systemu energetycznego.

W systemach energetycznych, w których źródłem energii jest silnik spalinowy [9, 10], należy określić związki wyrażone drugim równaniem w zależności (3). W tym celu wprowadzono pojęcie wielowymiarowej, statycznej charakterystyki silnika zdefiniowanej jako funkcja wektorowa [11]:

$$Y_s = f_2(\omega_s, M_s); (\omega_s, M_s) \in L_s. \quad (4)$$

gdzie L_s – zbiór możliwych do osiągnięcia punktów pracy silnika (ω_s, M_s) (rys. 4).



Rys.4. Schemat pola pracy silnika i charakterystyki odbiorników energii (oznaczenia w tekście)
 Fig. 4. The car engine working field and the courses of the resistance of car motion (symbols are explained in text)

Zgodnie z zależnością (4) każdemu punktowi na polu pracy silnika (rys. 4) można przypisać jedną wartość parametru będącego elementem wektora Y_s . W niniejszych rozważaniach będą to: parametr sterowania silnikiem U_s , jednostkowe i sekundowe zużycie paliwa (g_e i G_e), moc silnika (N_e) oraz jednostkowa toksyczność spalin. Na polu pracy silnika pokazano schematycznie dwie linie przedstawiające opory ruchu pojazdu dla określonego przełożenia przeniesione na pole pracy silnika z wyłączonymi odbiornikami energii elektrycznej (M_{SO}) i z włączonymi odbiornikami ($M_{OG} = M_{SO} + M_{SG}$). Momenty te jako parametry energetyczne modelu GW zaznaczone są na rysunku 2. Pole pracy silnika (rys. 4) ograniczone jest od góry charakterystyką pełnej mocy (M_{pm}), a od dołu charakterystyką oporów mechanicznych silnika (M_{om}).

4. Wpływ odbiorników energii elektrycznej na parametry silnika spalinowego

Procedura określania zależności parametrów silnika od obciążenia sieci elektrycznej opiera się na analizie modelu GW przedstawionego na rysunku 2. Strumień energii

przekazywany z wału silnika przetwarzany jest w generatorze na energię elektryczną zgodnie z zależnością:

$$M_{SG}\omega_S = \frac{(i_G + i_{AE})V_G}{\eta_{GE}}, \quad (5)$$

gdzie η_{GE} – sprawność przetwarzania energii obejmująca sprawność przekładni i sprawność generatora.

Dla przekładni **TR** (rys. 2) ważny jest związek:

$$\begin{vmatrix} M_G \\ \omega_G \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1/m_{GE} & 0 \\ 0 & m_{GE} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} M_{SG} \\ \omega_S \end{vmatrix}, \quad (6)$$

gdzie m_{GE} – moduł przekładni.

Zgodnie ze związkiem (6) dla przekładni **TR**:

$$M_G\omega_G = M_{SG}\omega_S. \quad (7)$$

Po przekształceniu zależności (5) otrzyma się związek:

$$M_{SG} = \frac{(i_G + i_{AE})V_G}{\eta_{GE}\omega_S}. \quad (8)$$

Moment obrotowy silnika do pokonania założonych oporów ruchu pojazdu i dla zadanego kąta pochylenia drogi $(F_t + F_p + mg \sin \alpha)$ (rys. 3) zależy od prędkości i numeru przełożenia N_p :

$$M_{SO} = f(\omega_S, N_p). \quad (9)$$

Dla zadanej ustalonej prędkości pojazdu i numeru przełożenia moment generowany przez silnik (rys. 2 i 4) wynosi:

$$M_S = M_{SO} + M_{SG}. \quad (10)$$

Jako przykład wykorzystania wielowymiarowej charakterystyki (4) wyrażonej w formie funkcji analitycznej [11] określone zostanie jednostkowe zużycie paliwa przedstawione w formie:

$$g_e = g(\omega_S, M_S). \quad (11)$$

Dla zadanej prędkości kątowej i przyjętej zależności (9) określić można sekundowe zużycie paliwa dla ruchu z wyłączonymi G_{eO} i włączonymi G_{eE} odbiornikami energii elektrycznej:

$$\begin{aligned} G_{eO} &= g_{eO} M_{SO} \omega_S, \\ G_{eE} &= g_{eE} (M_{SO} + M_{SG}) \omega_S. \end{aligned} \quad (12)$$

Przyrost zużycia paliwa dla zadanych warunków ruchu pojazdu wynosi:

$$\Delta G_e = G_{eE} - G_{eO}. \quad (13)$$

Dla zmieniających się w czasie warunków ruchu i zadanego czasu eksploatacji t_{ex} przybliżoną wartość przyrostu zużycia paliwa wyznacza związek:

$$\Delta m_{pal} = \int_0^{t_{ex}} \Delta G_e(t) dt. \quad (14)$$

W przytoczonej procedurze prowadzącej do otrzymania przybliżonej zależności (14) świadomie ograniczono się do rozpatrzenia stanów ustalonych, to znaczy, że $M_S = M$ (rys.2) lub ogólnie w zależności (3) $\dot{X} = 0$. Podkreślić jednakże trzeba, że modelowanie grafami wiązań jest szczególnie przydatne do modelowania dynamiki systemów energetycznych.

Podobne zależności jak dla zużycia paliwa można ustalić dla innych składowych wektora Y_S . W przytoczonym przykładzie wyznaczono również emisję tlenku węgla.

5. Przykłady numeryczne

Przykłady numeryczne zostały przygotowane dla samochodu *Fiat Stilo 1,6 Active 5 dr* wyposażonego w silnik ZI rozwijającego moc $N_e = 76$ kW przy prędkości obrotowej $n = 5750$ obr/min. Własności fizyczne modelowanego pojazdu oraz parametry niezbędne do obliczeń oporów ruchu pojazdu zamieszczone zostały w tabeli 1. Obliczenia obejmują wyznaczenie zużycia paliwa (G_e [g/km]) oraz emisji tlenku węgla (CO [g/km]) dla określonych parametrów pracy układu napędowego, wynikających z prędkości jazdy oraz załączonych dodatkowych odbiorników energii elektrycznej. Przeprowadzenie obliczeń wymagało przygotowania wielowymiarowej charakterystyki silnika [11], obejmującej charakterystykę zużycia paliwa oraz emisji tlenku węgla. Do odwzorowania wymienionych charakterystyk ciągłą funkcją prędkości kątowej i momentu obrotowego silnika posłużono się trójwymiarowymi funkcjami typu „Spline” [11]. Cechy funkcji zastosowanych do aproksymacji przebiegów wybranych parametrów pracy silnika oraz dokładności uzyskanych odwzorowań zamieszczono

w tabeli 2. Używając powyższych funkcji wygenerowane zostały charakterystyki: jednostkowego zużycia paliwa (rys. 5) oraz jednostkowej emisji tlenku węgla (rys. 6), do których dane uzyskano dzięki uprzejmości Centrum Badawczego Fiata.

Tabela 1. Własności fizyczne modelowanego pojazdu oraz parametry niezbędne do obliczeń oporów ruchu pojazdu

Table 1. Physical characteristics of the modeled vehicle that were needed for the resistance of motion calculations

Nazwa parametru	Wartość parametru
Masa samochodu	$m = 1480 \text{ kg}$
Wymiary samochodu	$L \times B \times H = 4253 \times 1756 \times 1525 \text{ [mm]}$
Promień dynamiczny opony	$r_d = 0,305 \text{ m}$
Przełożenie przekładni głównej	$i_g = 3,73$
Przełożenie na biegu I	$i_{bI} = 3,91$
Przełożenie na biegu II	$i_{bII} = 2,15$
Przełożenie na biegu III	$i_{bIII} = 1,48$
Przełożenie na biegu IV	$i_{bIV} = 1,2$
Przełożenie na biegu V	$i_{bV} = 0,9$
Wsp. oporu powietrza	$C_x = 0,32$
Wsp. oporu toczenia (gładki asfalt)	$f_{to} = 0,012$
Sprawność ukł. przeniesienia napędu	$\eta_{UPN} = 0,915$
Sprawność generatora	$\eta_{GE} = 0,700$

Tabela 2. Cechy funkcji zastosowanych do aproksymacji przebiegów wybranych parametrów pracy silnika oraz dokładności uzyskanych odwzorowań

Table 2. Approximation function parameters used to approximate some chosen engine working parameters and accuracy of description

Przebieg	Stopień wielomianu		Ilość węzłów		Współrzędne węzłów			δ_{sr} [%]
	Kierunek:		Kierunek:		Lp.	Kierunek:		
	ω	M_o	ω	M_o		ω	M_o	
G_e [kg/h]	3	3	-	-	-	-	-	0.39
CO [kg/h]	3	3	1	1	1	419	117	1.54

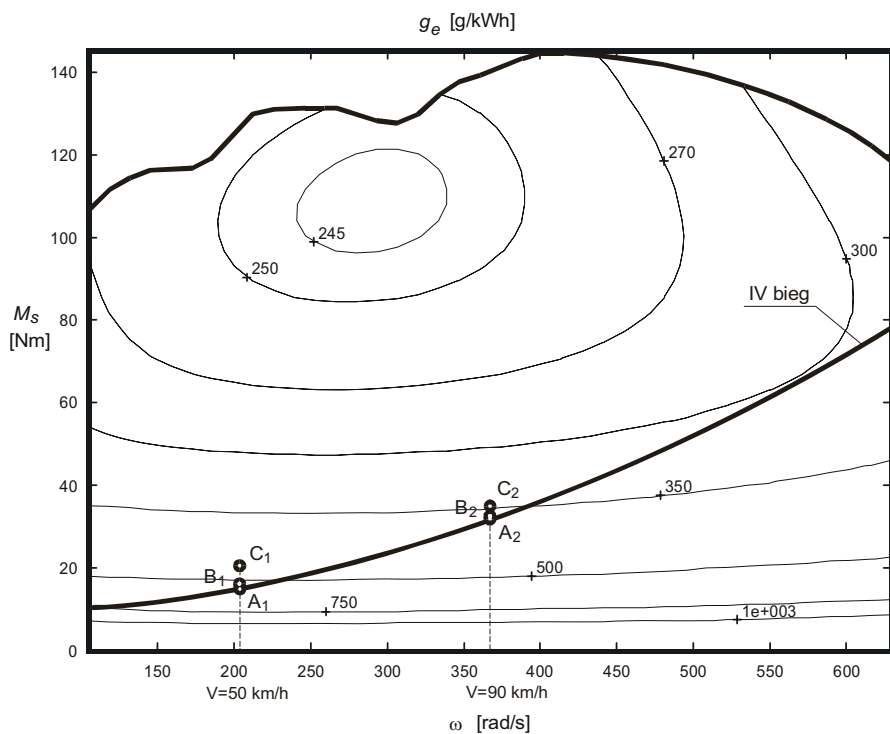
W badaniach symulacyjnych rozpatrywane były przypadki jazdy samochodu z dwiema prędkościami: 50 km/h i 90 km/h, którym odpowiadały prędkości kątowe wału silnika $\omega_1 = 204$ rad/s i $\omega_2 = 367$ rad/s. Dla tych dwóch prędkości jazdy wyznaczone zostały na podstawie modelu pojazdu (rys. 2 i 3) trzy przypadki obciążenia silnika:

- obciążenie oporami ruchu pojazdu i załączonymi odbiornikami energii elektrycznej, niezbędnymi dla prawidłowej pracy pojazdu,
- obciążenie jak w punkcie A i dodatkowo włączone światła mijania z podświetleniem konsoli (+177 W),
- obciążenie jak w punkcie A i dodatkowo włączona grupa odbiorników dająca maksymalny, ciągły pobór energii elektrycznej pokrywany w całości przez generator (+800 W).

Łącznie 6 przypadków obciążenia (po 3 dla każdej prędkości) i odpowiadające im punkty pracy silnika wraz z krzywą oporów ruchu pojazdu dla wybranego biegu IV w przekładni wybieralnej pokazane zostały na rysunkach 5 i 6. Dokładny opis punktów pracy silnika oraz wyniki przeprowadzonych obliczeń zamieszczono w tabeli 3.

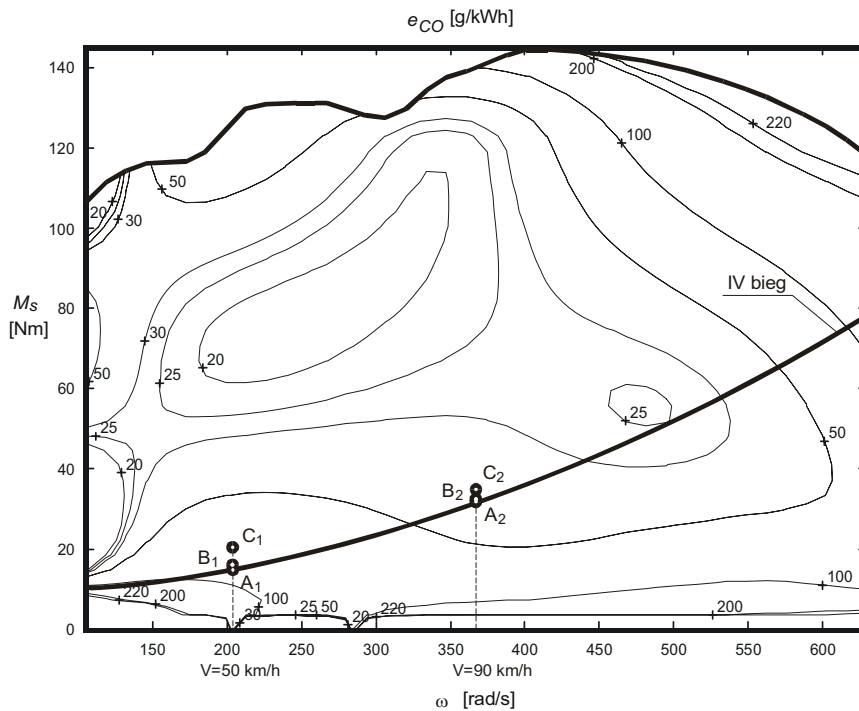
Tabela 3. Wyniki obliczeń
Table 3. Calculations results

Punkt	ω [rad/s]	M_s [Nm]	CO [g/km]	G_e [g/km]	G_e [dm ³ /100 km]	ΔG_e [dm ³ /100 km]
A ₁	204	15.00	5.52	33.2	4.43	0.00
B ₁	204	16.24	5.77	34.2	4.56	0.14
C ₁	204	20.60	6.45	37.8	5.05	0.62
A ₂	367	32.00	5.24	47.5	6.33	0.00
B ₂	367	32.69	5.29	48.0	6.40	0.07
C ₂	367	35.11	5.45	49.8	6.64	0.31



Rys. 5. Charakterystyka jednostkowego zużycia paliwa z naniesionymi punktami pracy silnika oraz krzywą oporów ruchu pojazdu dla wybranego IV biegu w przekładni wybieralnej (linia ciągła pogrubiona). A_1, B_1, C_1 – punkty pracy silnika obciążonego różnymi odbiornikami elektrycznymi przy prędkości jazdy 50 km/h. A_2, B_2, C_2 – punkty pracy silnika obciążonego różnymi odbiornikami elektrycznymi przy prędkości jazdy 90 km/h

Fig. 5. Map of specific fuel consumption with some points of engine working conditions and course of the resistances of car motion while driving in fourth gear (continues double with line). A_1, B_1, C_1 – working points engine loaded with some electrical energy consumers by 50 km/h. A_2, B_2, C_2 - working points engine loaded with some electrical energy consumers by 90 km/h



Rys. 6. Charakterystyka jednostkowej emisji tlenku węgla z naniesionymi punktami pracy silnika oraz krzywą oporów ruchu pojazdu dla wybranego IV biegu w przekładni wybieralnej (linia ciągła pogrubiona). A_1, B_1, C_1 – punkty pracy silnika obciążonego różnymi odbiornikami elektrycznymi przy prędkości jazdy 50 km/h. A_2, B_2, C_2 – punkty pracy silnika obciążonego różnymi odbiornikami elektrycznymi przy prędkości jazdy 90 km/h

Fig. 6. Map of specific carbon monoxide emissions with some points of engine working conditions and course of the resistances of car motion while driving in fourth gear (continues double with line). A_1, B_1, C_1 – working points engine loaded with some electrical energy consumers by 50 km/h. A_2, B_2, C_2 – working points engine loaded with some electrical energy consumers by 90 km/h

6. Uwagi końcowe

We współczesnych samochodach załączanie odbiorników energii przez kierowcę podlega nadzorowi elektronicznych sterowników, który jest prowadzony w taki sposób, aby nie przeciążyć sieci elektrycznej pojazdu. Moc jednocześnie załączonych odbiorników, poza napędem samochodu, najczęściej nie przekracza 1,5 kW, lecz po planowanym wprowadzeniu elektromagnetycznego napędu zaworów rozrzędu i elektrycznego napędu pompy cieczy chłodzącej może ona dochodzić do 3 kW.

Obecnie w Europie nie bada się spełnienia wymagań homologacyjnych z włączonymi dodatkowymi odbiornikami energii, a z przedstawionej powyżej analizy wynika, że w pewnych warunkach ich wpływ na emisję związków toksycznych w spalinach, jak również zużycie paliwa może być istotny. W zamieszczonym w pracy przykładzie

numerycznym stwierdzono wzrost zużycia paliwa wynoszący 0,62 dm³/100 km po załączeniu odbiorników elektrycznych o łącznej mocy 800 W. Jednocześnie nie zauważono istotnych zmian w zużyciu paliwa oraz emisji tlenku węgla po załączeniu świateł mijania w pojeździe (tab. 3).

Wobec silnie zmiennych obciążeń silnika wynikających nie tylko z warunków ruchu, ale i z losowego załączania odbiorników, w pojeździe wyraźnie zarysowuje się potrzeba wyznaczenia dynamicznych charakterystyk silników oraz tworzenia dynamicznych modeli silnika pozwalających prowadzić symulacje, które będą reprezentatywne dla rzeczywistych warunków pracy silnika.

Literatura

- [1] WRIGHT K.: *Watt's next*. Engine Technology International, June 2001.
- [2] CROSSE J.: *Start of a new generation*. Engine Technology International, March 2002.
- [3] HOLLAND R.: *Electric shock*. Engine Technology International, June 2000.
- [4] GOLDSTEIN R.: *Variables of electromagnetic valve actuator performance*. Engine Technology International, November 1997.
- [5] RILEY R.Q.: *Alternative cars in the 21st century: a new personal transportation paradigm*. SAE Inc., Warrendale, PA, USA 1994.
- [6] KNEBA Z.: *Wpływ załączonych dodatkowych odbiorników mocy na testowe wyniki analizy spalin samochodu osobowego*. Archiwum Motoryzacji 2003.
- [7] KARNOPP D.C., MARGOLIS D.L., ROSENBERG R.C.: *System dynamics: a unified approach*. Wiley, New York 1990.
- [8] CICHY M.: *Modelowanie systemów energetycznych*. Wydawnictwo PG, Gdańsk 2001.
- [9] CICHY M., MAKOWSKI S.: *Energy flows modelling of series hybrid electric vehicle*. W: Proc. MOTAUTO '02, vol. 2, Russe: Tech. Univ. Russe 2002.
- [10] KROPIWNICKI J., MAKOWSKI S.: *Bilans energetyczny w pojeździe hybrydowym z napędem szeregowym*. Mat. Konf. „Problemy jakościowe, energetyczne i eksploatacyjne w maszynach cieplnych”, ATR Bydgoszcz, Bydgoszcz 2004.
- [11] KROPIWNICKI J.: *Model układu silnik-pojazd z wykorzystaniem charakterystyk statycznych silnika*. Rozprawa doktorska. Promotor: Cichy M. Politechnika Gdańska 2001.

The influence of electrical energy consumers on combustion engine parameters

S u m m a r y

The paper presents the model of a powertrain system of a vehicle with internal combustion engine (ICE) by using Bond Graphs. The special attention was paid for electrical part of the system. Some chosen parameters and equations for the model have been presented. Based on presented in thesis [1] multidimensional ICE characteristics procedure of calculations of the influence of electrical energy consumers for car characteristics has been given. Some numerical examples of characterizing some parameters are also included.