

Linie optymalne sterowania silnikiem

ZBIGNIEW PAWELSKI, TOMASZ PAŁCZYŃSKI

Politechnika Łódzka, Instytut Pojazdów

Określenie linii optymalnej sterowania silnikiem zapewnia pracę zintegrowanego układu napędowego pojazdu w obszarze sterowań optymalnych. Proponowana procedura optymalizacyjna daje możliwość łatwego wykluczenia obszaru sterowań niekorzystnych, oraz pozwala uwzględnić inne kryteria (np. cichobieżność silnika). Optymalizację wykonano przy użyciu programu Matlab Simulink, Simulink Response Optimization: Signal Constraint.

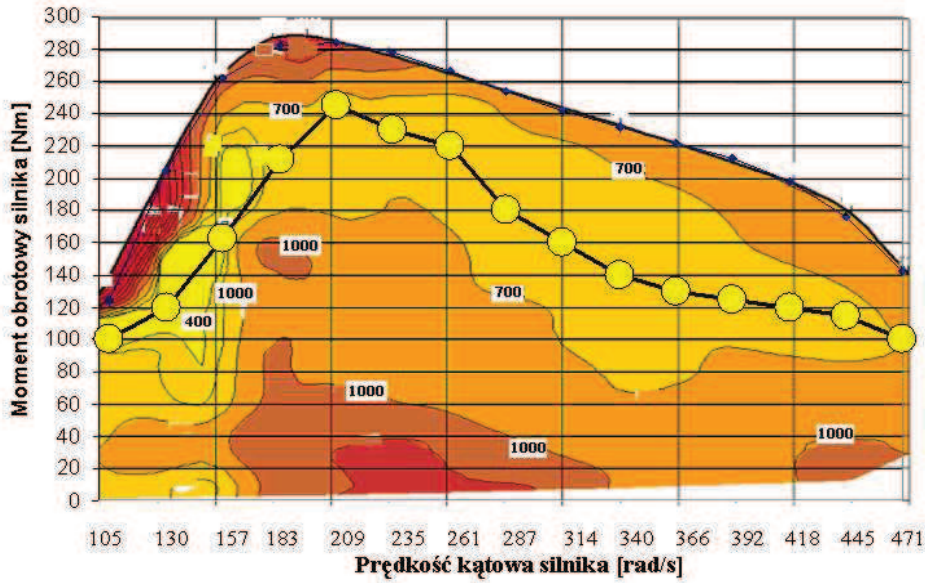
1. Wstęp

W zagadnieniu sterowania silnikiem, optymalizacja rozumiana jest jako dążenie do osiągnięcia stanu, spełniającego określone wymagania. Rozróżnia się optymalizację:

- jednokryterialną, kiedy wymagania dotyczą jednego kryterium,
- wielokryterialną (wektorową, polioptymalizację), kiedy osiągnięcie stanu jest zależne od wielu kryteriów [3].

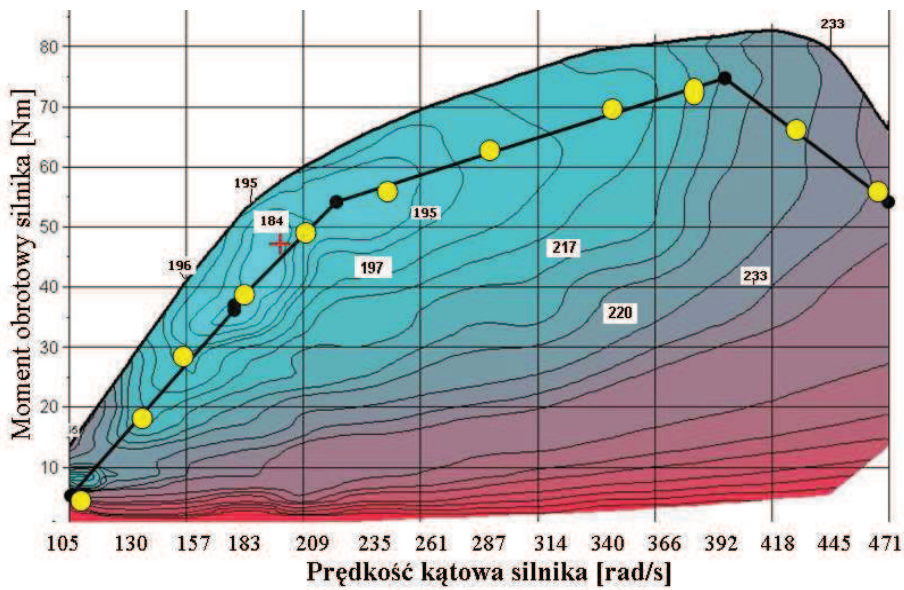
Zagadnienie wyznaczenia linii optymalnej ze względu na poszczególne toksyczne składniki spalin oraz jednostkowe zużycie paliwa jest podstawowym w analizach optymalizacyjnych ruchu pojazdu.

Proponowana procedura optymalizacyjna opiera się na przeszukiwaniu macierzy opisujących charakterystyki emisji szkodliwych składników spalin i jednostkowego zużycia paliwa, w postaci jak np. na rysunku 1. Bazę danych stanowią wyniki badań hamownianych silnika VW 1.9TDI (AJM) o ZS przeprowadzone w Instytucie Pojazdów Politechniki Łódzkiej. Badania symulacyjne odniesiono do normy EURO 3 ze względu na rok budowy silnika.

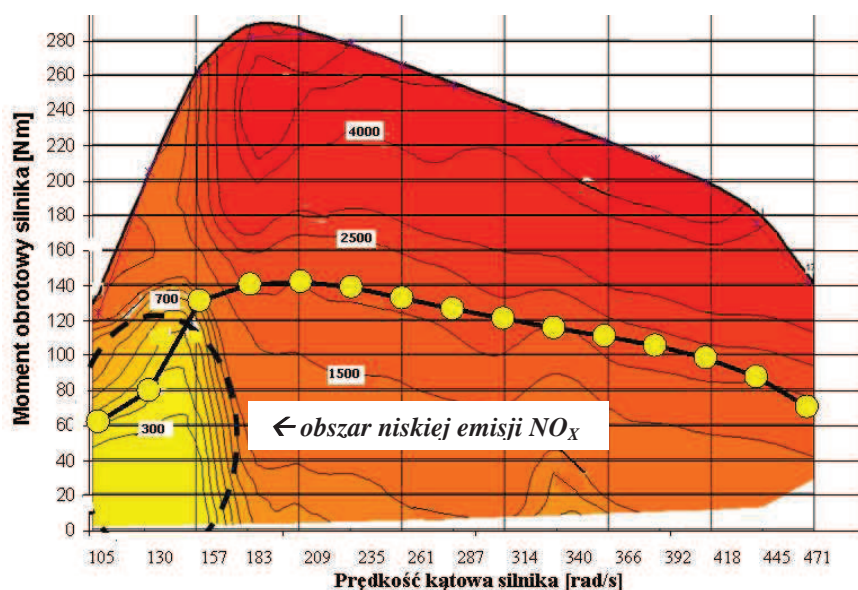


Rys. 1. Przebieg linii sterowania, optymalnej ze względu na emisję CO [ppm].
 Fig. 1. Steering line course, optimal emission of CO [ppm].

2. Linie optymalne jednokryterialne



Rys. 2. Przebieg linii sterowania, optymalnej ze względu na emisję ge [g/kWh].
 Fig. 2. Steering line course, optimal emission of ge [g/kWh].



Rys. 3. Przebieg linii sterowania, optymalnej ze względu na emisję NO_x [ppm].
Fig. 3. Steering line course, optimal emission of NO_x [ppm].

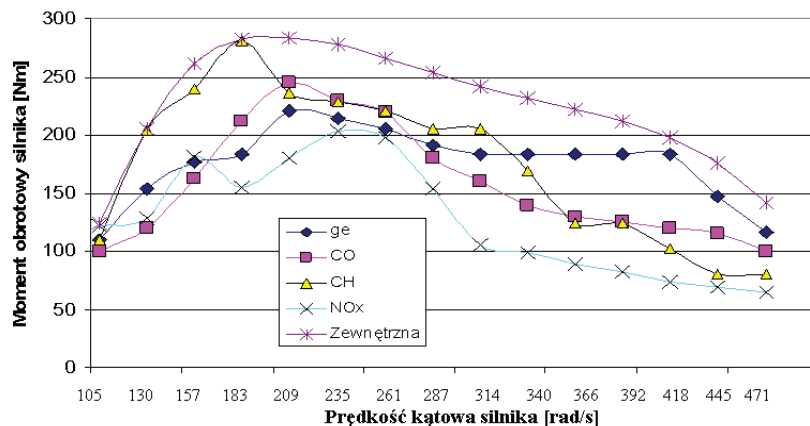
W przypadku optymalizacji jednokryterialnej można przyjąć jako funkcję celu sumę wartości chwilowych danego parametru. W wyniku przeszukiwania ww. macierzy otrzymuje się linię, która przyporządkowuje wartość minimalną optymalizowanego parametru kolejnej prędkości obrotowej i odpowiadającemu jej momentowi obrotowemu silnika, jak na przykład na rysunkach 1÷3.

Ze względu na proces spalania w silniku spalinowym o ZS, emisja NO_x rośnie wraz z obciążeniem, czyli linia optymalna ze względu na ten składnik przebiega dla zerowych obciążeń. W związku z tym zaproponowano, by wynikała ona np. z czasu rozpędzania pojazdu do prędkości 28 m/s. Opierając się na ruchu miejskim w Łodzi (pomiar własny) przyjęto średni czas rozpędzania 25s. Z analizy poszukiwania linii jednokryterialnej (NO_x) ze względu na założony czas rozpędzania wynika, iż wymagany moment obrotowy silnika powinien stanowić 50% wartości maksymalnej (charakterystyki zewnętrznej) – tabela 1 i rysunek 3.

Tabela 1. Średni czas rozpędzania w zależności od obciążenia.
Table 1. Average time of acceleration in condition of loading.

Obciążenie [%]	100%	90%	80%	70%	65%	60%	50%
Czas rozpędzania 0-28 m/s[s]	12	13,3	14,8	16,8	18,2	19,5	24,5

Na rysunku 4 zestawiono linie jednokryterialne dla silnika 1.9 TDI AJM, wyznaczone według powyżej zaproponowanego sposobu.

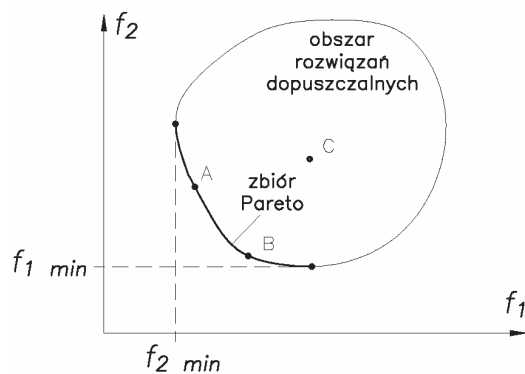


Rys. 4. Linie jednokryterialne na tle charakterystyki zewnętrznej silnika.
Fig. 4. Single objective steering lines at external characteristic of engine.

3. Optymalizacja wielokryterialna

3.1. Wstęp teoretyczny [3]

Przy dużej liczbie kryteriów dochodzi do sprzeczności pomiędzy postawionymi warunkami, jak na rysunku 4. Poszukiwane rozwiązanie nie optymalizuje wszystkich kryteriów rozważanych osobno, lecz stanowi pewnego rodzaju kompromis pomiędzy nimi. W najprostszym ujęciu rozwiązanie jest optymalne w sensie Pareto, jeżeli nie jest możliwe znalezienie rozwiązania lepszego ze względu, na co najmniej, jedno kryterium bez pogorszenia pozostałych.



Rys. 5. Definicja optimum w sensie Pareto [3].
Fig. 5. Pareto optimum, definition [3].

Graficzną interpretację punktów paretooptimalnych przedstawia rysunek 5. Rozwiązanie C może zostać polepszone zarówno wobec kryterium f_1 , jak i f_2 . Dla rozwiązań A i B taka możliwość nie istnieje - poprawa względem jednego kryterium powoduje pogorszenie względem drugiego. Należą one, zatem do zbioru optymalnego w sensie Pareto.

3.1.1. Metoda kryteriów ważonych (Weight Objectives Metod) [3], rysunek 6

Polega ona na sprowadzeniu optymalizacji wielokryterialnej do optymalizacji jednokryterialnej przez wprowadzenie kryterium zastępczego będącego sumą ważoną kryteriów [3].

$$Z = \sum_{q=1}^M (w_q \cdot f_q(\mathbf{X})) \rightarrow \text{MIN} \quad (1)$$

zakładając:

$$0 \leq w_q \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{q=1}^M w_q = 1 \quad (3)$$

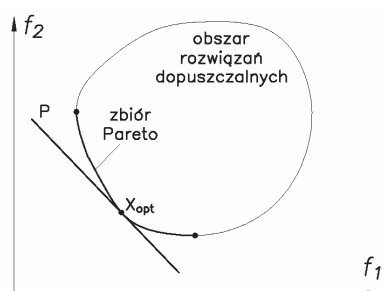
gdzie:

w – współczynnik wagi,

q – q-te kryterium,

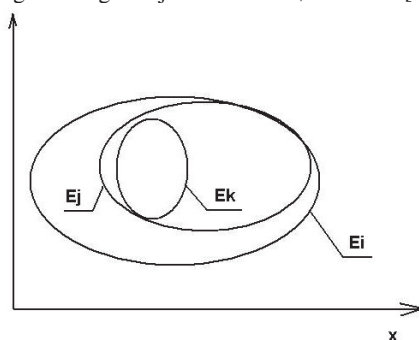
M – liczba kryteriów.

Ze względu na zrównoważenie wpływu poszczególnych kryteriów można wprowadzić normowanie kryteriów. Istotnym ograniczeniem tej metody są założone współczynniki wag.



Rys. 6. Optimum wg metody ważonych kryteriów [3].

Fig. 6. Wright objectives metod, definition[3].



Rys. 7. Optimum wg metody ograniczonych kryteriów [3].

Fig. 7. Trade off metod, definition[3].

3.1.2. Metoda kryteriów ograniczonych (Trade Off) [3], rysunek 7

W tej metodzie ustalane są poziomy wartości, jakie mogą przyjmować poszczególne kryteria, co prowadzi do ograniczenia przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. Problem polioptymalizacji jest sprowadzony do optymalizacji względem wybranego kryterium przy zwiększonej o $(M-1)$ liczbie ograniczeń wynikających z pozostałych kryteriów, co matematycznie można zapisać następująco:

$$\begin{aligned}
 f_r(x) &\rightarrow MIN \\
 f_i(x) &\leq \varepsilon_i \Rightarrow (x, y) \in E_i \\
 f_k(x) &\leq \varepsilon_k \Rightarrow (x, y) \in E_k \\
 \varepsilon_k &\leq \varepsilon_i
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

gdzie:

- i, k - nr kolejnego kryterium
- ε_i - wartość limitująca dane kryterium
- f_i - dane kryterium
- r - liczba kryteriów.

3.2. Wyznaczenie linii polioptymalnych-współczynniki wag

Przy wyznaczaniu linii polioptymalnych (z linii jednokryterialnych) należy określić wagę poszczególnych kryteriów, np. różny wpływ szkodliwych składników spalin na środowisko, uwarunkowania prawne itp. Współczynniki wag mogą być zmienne, np. w funkcji prędkości obrotowej silnika, temperatury itp. Zaproponowane poniżej kryteria wyboru współczynników wag posłużyły określeniu przebiegów linii optymalnych, przy użyciu programów Microsoft Excel i MatLab Simulink.

➤ Wariant I - Współczynniki wag ze względu na stopień szkodliwości składników spalin [1]

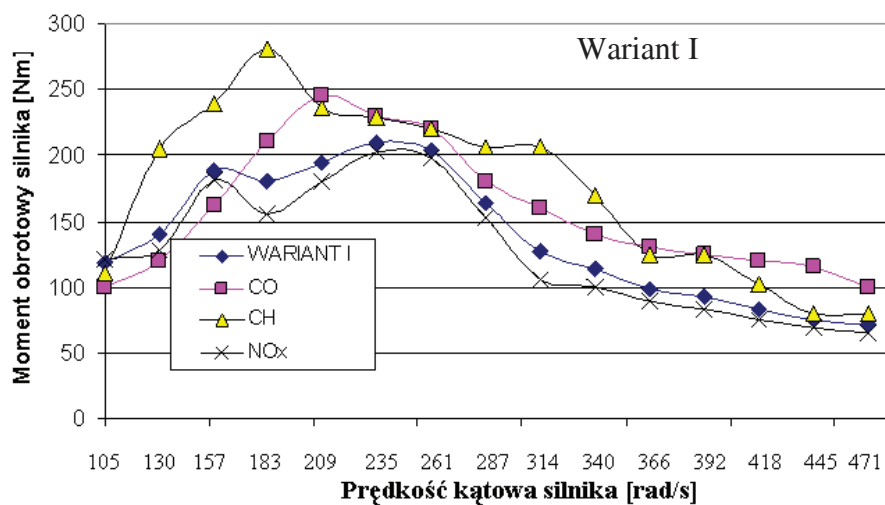
Miernikiem szkodliwości toksycznych składników spalin [1] może być toksyczność względna określona jako stosunek stężenia dopuszczalnego substancji przyjętej jako wzorzec z analogicznym stężeniem substancji ocenianej. Jak wiadomo, normy sanitarne poszczególnych państw różnią się znacznie między sobą a także zmieniają się w czasie. Pomimo to toksyczność względna może być traktowana jako miernik absolutny, w pełni jednoznaczny, stopnia szkodliwości poszczególnych substancji [1]. W tabeli 2 przedstawiono zależność stopnia szkodliwości spalin odniesioną do emisji CO.

Tabela 2. Toksyczność względna podstawowych substancji emitowanych przez silnik [1].
Table 2. Relative toxicity of basic substance emitted by engine [1].

Szkodliwy składnik spalin	Wg wartości granicznej	
	Średniej dobowej ([%])	Maksymalnej ([%])
CO	1,00 (8%)	1,00 (5%)
CH	1,50 (12%)	1,20 (5%)
NO _x	10,50 (81%)	20,00 (90%)

Uwzględniając:

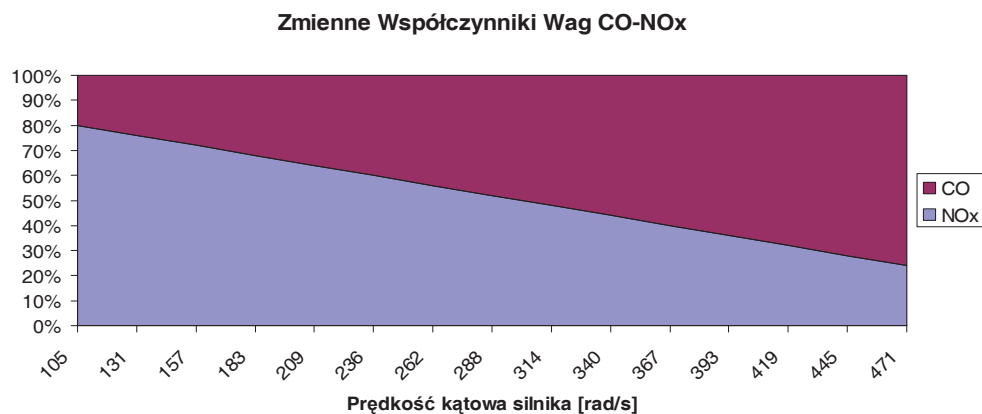
- współczynniki wag według średniej dobowej toksyczności względnej,
 - metodę optymalizacji według ważonych kryteriów,
- wyznaczono wypadkową linię sterowania, jak na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg linii sterowania silnikiem dla współczynników wag zgodnie z tabelą 2.
Fig. 8. Steering line for weighted conditions from table 2.

➤ Wariant II- Emisja CO i NO_x

Za [2] przyjęto zależność jak na rysunku 9, która pokazuje, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika waga NO_x powinna maleć na rzecz CO. Zależność ta wynika z analiz wpływu szkodliwych składników spalin na środowisko.

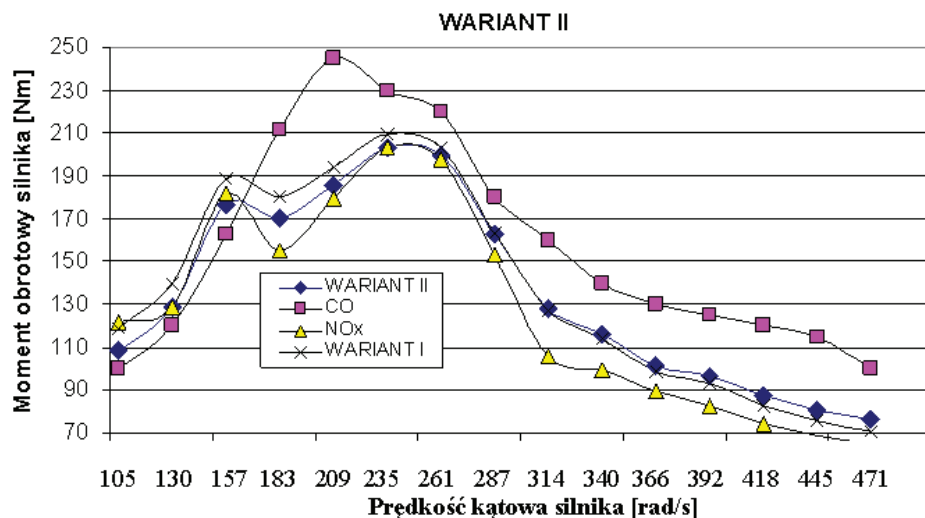


Rys. 9. Zmienne współczynniki wag pomiędzy emisją CO i NO_x w funkcji prędkości obrotowej [2].

Fig. 9. Variable weight ratio between CO and NO_x toxicity as engine speed function [2].

Uwzględniając:

- linię WARIANT I,
- współczynniki wag według rysunku 9 (dopuszczono wpływ tego kryterium na WARIANT I maksymalnie w 30%),
- metodę optymalizacji według kryteriów ważonych, można wyznaczyć wypadkową linię sterowania jak na rysunku 10.



Rys. 10. Wpływ zmiennych współczynników wag (rys. 9) na przebieg wypadkowej linii sterowania ze względu na CO i NO_x.

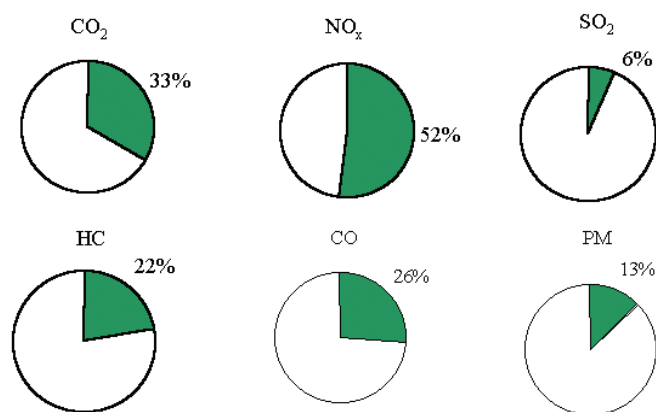
Fig. 10. Influence of variable weight ratio (fig. 9) resultant steering line course in condition of CO and NO_x.

Jak wynika z rysunku 10, wraz ze wzrostem prędkości kątowej silnika linia optymalna zbliża się do linii optymalnej ze względu na CO, oddalając się od linii optymalnej ze względu na NO_x.

➤ **Wariant III - Norma toksyczności spalin EURO3**

Środki transportu są jedną z głównych przyczyn zanieczyszczenia atmosfery i są odpowiedzialne za odpowiednio 52, 26 i 22% zawartości tlenków azotu, tlenku węgla i węglowodorów (rys. 11), a w miastach nawet za 70% zawartości tlenków azotu i 90% stężenia ołowiu. Mimo wysiłków w zakresie usuwania zanieczyszczeń z atmosfery, na całym świecie ich obecny poziom często przekracza maksymalne wartości ustalone przez Światową Organizację Zdrowia (WHO - *World Health Organization*) [5].

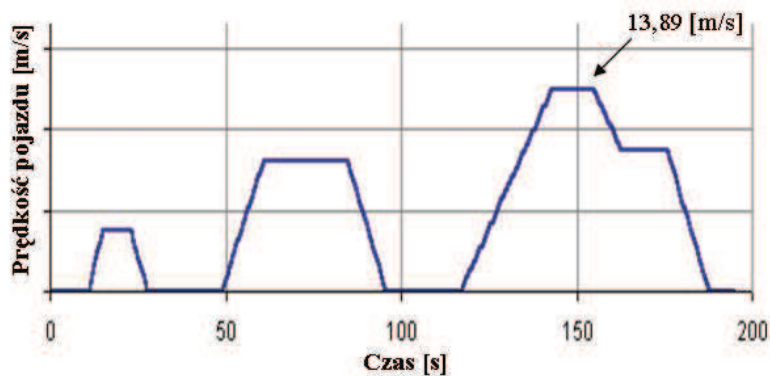
Na początku lat pięćdziesiątych XX w. naukowcy kalifornijscy po raz pierwszy połączyli skażenie środowiska z ruchem pojazdów samochodowych. Prace nad ograniczeniem szkodliwej emisji z pojazdów samochodowych w Europie zostały zapoczątkowane w kilkanaście lat później przez Europejską Wspólnotę Gospodarczą (dyrektywy EEC) i Europejską Komisję Gospodarczą ONZ (regulaminy ECE).



Rys. 11. Emisja związków toksycznych ze źródeł motoryzacyjnych [5].

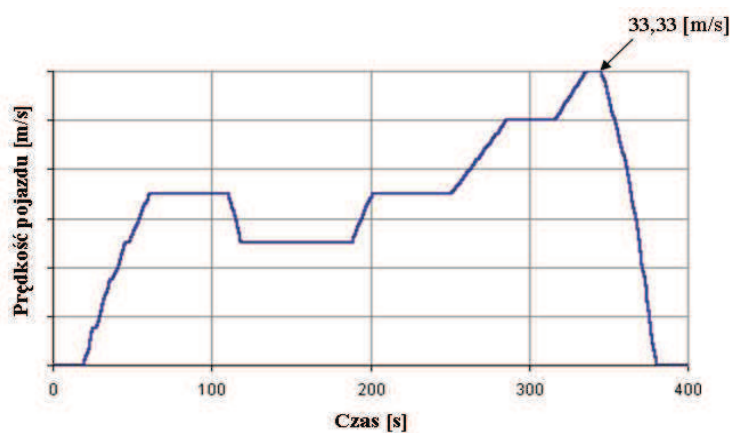
Fig. 11. Toxicity emission from motorization source [5].

Obecnie następuje znaczne zaostrzenie międzynarodowych przepisów dotyczących ochrony środowiska naturalnego, zmniejszających wielokrotnie dotychczasowe normy emisji związków toksycznych. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono główne parametry wymaganych przebiegów prędkości pojazdu w funkcji czasu, stosowanych w europejskich testach toksyczności spalin.



Rys. 12. Przebieg prędkości pojazdu dla testu toksyczności spalin ECE.

Fig. 12. Vehicle speed course as time function for ECE toxicity test.



Rys. 13. Przebieg prędkości pojazdu dla testu toksyczności spalin EUDC.

Fig. 13. Vehicle speed course as time function for EUDC toxicity test.

Tabela 3. Test NUDC=4 X ECE 15 + EUDC [6]

Table 3. NUDC= 4 X ECE15 + EUDC test [6]

Charakterystyka	Jednostka	ECE 15	EUDC	RAZEM
Odległość	m	$4 \times 1.013 = 4052$	6955	<u>11007</u>
Czas trwania	s	$4 \times 195 = 780$	400	<u>1180</u>
Prędkość średnia	m/s	5,19 (z biegiem jałowym)	17,39	<u>10,97</u>
Prędkość maksymalna	m/s	13,89	33,33	

Jak wynika z tabeli 3, można przyjąć iż pojazd podczas testu NEUDC porusza się ze średnią prędkością około 11 m/s, której odpowiada moc silnika, co najmniej, 5 kW i prędkość kątowna silnika do $\omega=140$ [rad/s].

Dopuszczalne poziomy emisji toksycznych spalin dla kolejnych norm, od Euro 1 do Euro 5, zawarto w tabeli 4.

Tabela 4. Normy toksyczności spalin [6]

Table 4. Toxicity emission standards [6]

Europejskie normy emisji dla samochodów osobowych (kategorii M ₁ [*]), g/km						
Norma	Data (wprowadzenia)	CO	CH	CH+NO _x	NO _x	PM
Euro 1	1992.07	2.72		0.97		0.14
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro 2, DI	1996.01	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro 5	2009.09	0.50	-	0.25	0.20	0.005

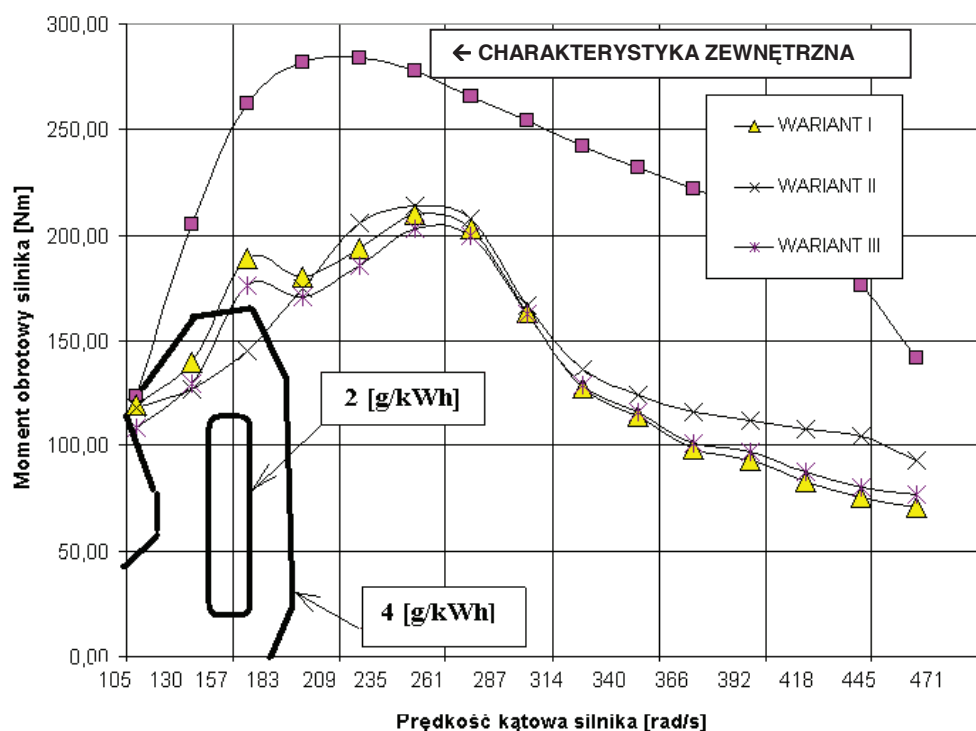
*Kategoria M₁: Pojazdy przeznaczone do transportu osób posiadające poza siedzeniem kierowcy maksymalnie osiem miejsc siedzących, zgodnie z dyrektywą europejską (70/156/EWG)

Według powyższych informacji można wyznaczyć obszar emisji jednostkowej [g/kWh] poszczególnych szkodliwych składników spalin. Zgodnie z ww. założeniami, wartość maksymalna emisji jednostkowej dla NO_x, wynosi 4 g/kWh ograniczając cały obszar pracy silnika jak na rysunku 14.

Jak pokazuje powyższa analiza, norma Euro 3 znacznie ogranicza dopuszczalny zakres pracy silnika a tym samym zakres eksploatacji pojazdu (prędkość kątowną silnika do $\omega=157$ rad/s). W związku z powyższym kryterium zostało to potraktowane jako sprawdzające. Do wyznaczenia wypadkowej linii sterowania (rys. 14) przyjęto:

- współczynniki wag według tabel 3 i 4,
- metodę optymalizacji według ważonych kryteriów.

Norma Euro 4 obniża dopuszczalny poziom emisji NO_x o 50% (2 g/kWh) a zakres pracy silnika zawęża się do jednej prędkości obrotowej $\omega=155$ rad/s, rysunek 14.



Rys. 14. Charakterystyka jednostkowej emisji NO_x [g/kWh] wraz z naniesionymi liniami sterowania Wariant I, II, III.

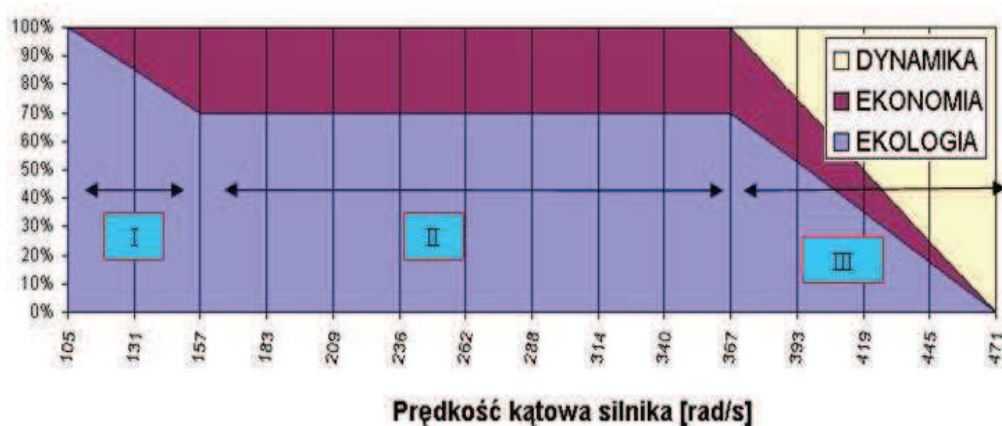
Fig. 14. Elementary NO_x emission [g/kWh] with steering lines: Version I, II, III.

➤ **Wariant IV - Zmienne współczynniki wag - EKONOMIA-EKOLOGIA-DYNAMIKA, rysunek 15**

Rozkład współczynników wag pomiędzy uwarunkowaniami ekonomicznymi, ekologicznymi i dynamicznymi przyjęto zgodnie z rysunkiem 15, z którego wynika, że uwzględniając trzy kryteria ogólne:

- **DYNAMIKA** - praca silnika dla 100% obciążenia-charakterystyka zewnętrzna,
- **EKOLOGIA** - praca silnika wg linii sterowania uwzględniającej polioptymalnie szkodliwe składniki spalin (linia np. Wariant III),
- **EKONOMIA** - linia sterowania silnika wynikająca z jednostkowego zużycia paliwa, „linia ge”. Można podzielić cały zakres pracy silnika spaliniowego na trzy przedziały:
 - Przedział I - (prędkości kątowne 105-157 rad/s) obszar pracy silnika mający decydujący wpływ na emisję szkodliwych składników spalin w testach toksyczności spalin. Kryterium **EKOLOGIA** przypisano współczynnik wagi zmieniający się od 100% do 70%,

- Przedział II- (prędkości kątowne 157-367 rad/s) obszar, w którym przyjęto współczynniki wag dla kryterium EKOLOGIA 70% i dla EKONOMIA 30% (ze względu na bardzo płaską charakterystykę ge [g/kWh],
- Przedział III- (prędkości kątowne 367-471 rad/s) obszar, w którym przyjęto zmienne współczynniki wag:
 - dla prędkości obrotowej silnika 367 rad/s-EKOLOGIA 70%, EKONOMIA 30%, DYNAMIKA 0%,
 - dla prędkości obrotowej silnika 471 rad/s-EKOLOGIA 0%, EKONOMIA 0%, DYNAMIKA 100%.



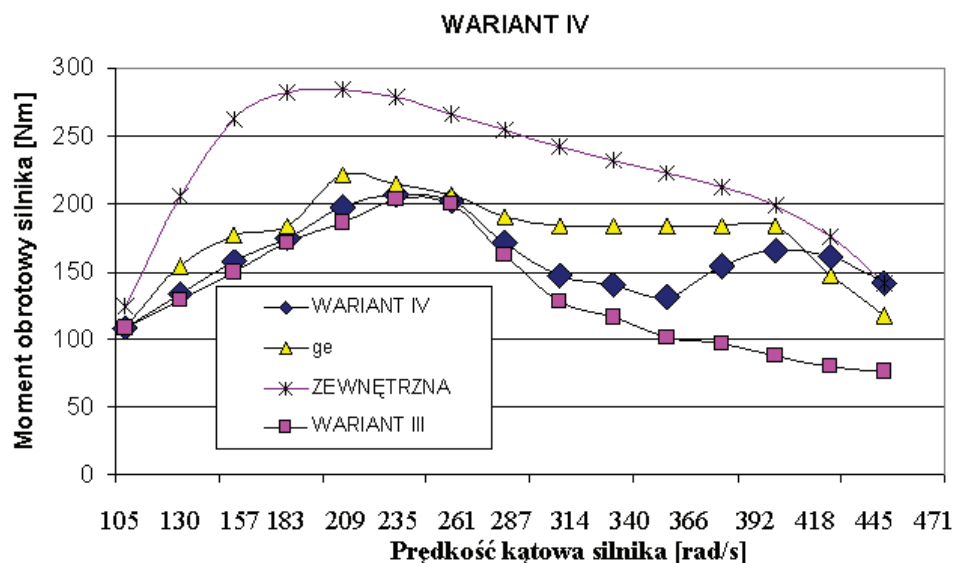
Rys. 15. Zmienne współczynniki wag - propozycja (EKOLOGIA-EKONOMIA-DYNAMIKA).

Fig. 15. Variable weight ratio - proposition (ECOLOGY, ECONOMY, DYNAMICS).

Do wyznaczenia wypadkowej linii sterowania przyjęto:

- współczynniki wag zgodnie z rysunkiem 15;
- metodę optymalizacji według ważonych kryteriów.

Jak wynika z rysunku 16, linie Wariantu IV w zakresie średnich obciążeń w niewielkim stopniu zbliżają się do linii optymalnej dla ge. Natomiast przy prędkościach obrotowych powyżej 367 rad/s następuje wyraźne zbliżenie się linii wypadkowej do charakterystyki zewnętrznej (DYNAMIKA - dąży do 100%). Należy się spodziewać, że proces rozpędzania pojazdu według linii sterowania Wariant IV, nie zapewni najniższych wartości analizowanych wielkości. Linie te są propozycją, która dopiero po opracowaniu statystycznym rzeczywistego ruchu pojazdu, da możliwość swej weryfikacji.



Rys. 16. Wpływ zmiennych współczynników wag EKONOMIA-EKOLOGIA-DYNAMIKA (zgodnie z rysunkiem 10) na przebieg linii wypadkowych.

Fig. 16. Influence of variable weight ratio ECONOMY-ECOLOGY-DYNAMICS (based in fig.10) resultant steering line.

➤ **Wariant V- Praca silnika ze stałą prędkością kątową w procesie rozpędzania pojazdu**

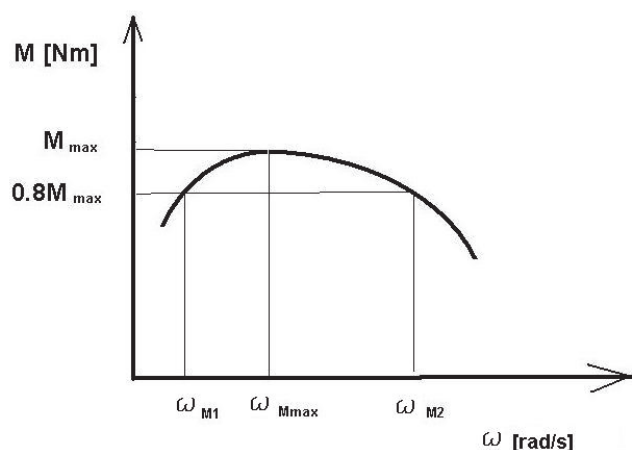
Zastosowanie przekładni bezstopniowej CVT wprowadza dodatkowy stopień swobody układu, gdyż daje możliwość ustalenia prędkości obrotowej silnika w_{opt} niezależnie od procesu rozpędzania. Po osiągnięciu przez przekładnię bezstopniową przełożenia maksymalnego i potrzebie dalszego rozpędzania pojazdu układ sterowania powinien dalszą część rozpędzania zrealizować przez zwiększenie prędkości obrotowej silnika. W związku z powyższym należy wyznaczyć linię dojścia do punktu optymalnego a także prędkość optymalną, czyli punkt ustalenia prędkości obrotowej silnika na linii optymalnej. Jako linię optymalną przyjęto linię Wariantu I wyznaczoną metodą ważonych kryteriów, dzięki czemu zagadnienie wyznaczenia punktu optymalnego sprowadza się do zagadnienia liniowego. Do wyznaczenia w_{opt} użyto także metodę ograniczonych kryteriów. Przyjęte kryteria:

– Kryterium momentu obrotowego silnika, (rys. 17):

$$M(\omega) \in \langle 0.8 \cdot M_{\max}, M_{\max} \rangle \Rightarrow \omega \in (\omega_{M1}, \omega_{M2}) \quad (5)$$

gdzie:

- $M(\omega)$ - moment obrotowy silnika, funkcja jego prędkości obrotowej [Nm]
- M_{\max} - maksymalny moment obrotowy silnika [Nm]
- ω - prędkość kątowa silnika [rad/s]
- ω_{M1}, ω_{M2} - prędkości kątowe ograniczające obszar ze względu na postawione kryterium.



Rys. 17. Kryterium momentu obrotowego.

Fig. 17. Engine torque criteria.

- Kryterium jednostkowego zużycia paliwa g_e (interpretacja geometryczna analogiczna do linii z rysunku 17)

$$g_e(M, \omega) \in \langle g_{e\min}, 1.2 \cdot g_{e\min} \rangle \Rightarrow \omega \in (\omega_{ge1}, \omega_{ge2}) \quad (6)$$

gdzie:

- $g_e(M, \omega)$ - jednostkowe zużycie paliwa, funkcja prędkości obrotowej silnika i momentu obrotowego [g/kWh],
 $g_{e\min}$ - minimalna wartość jednostkowego zużycia paliwa [g/kWh],
 $\omega_{ge1}, \omega_{ge2}$ - prędkości kątowne ograniczające obszar ze względu na postawione kryterium [obr/min].

- Kryterium toksycznych składników spalin.

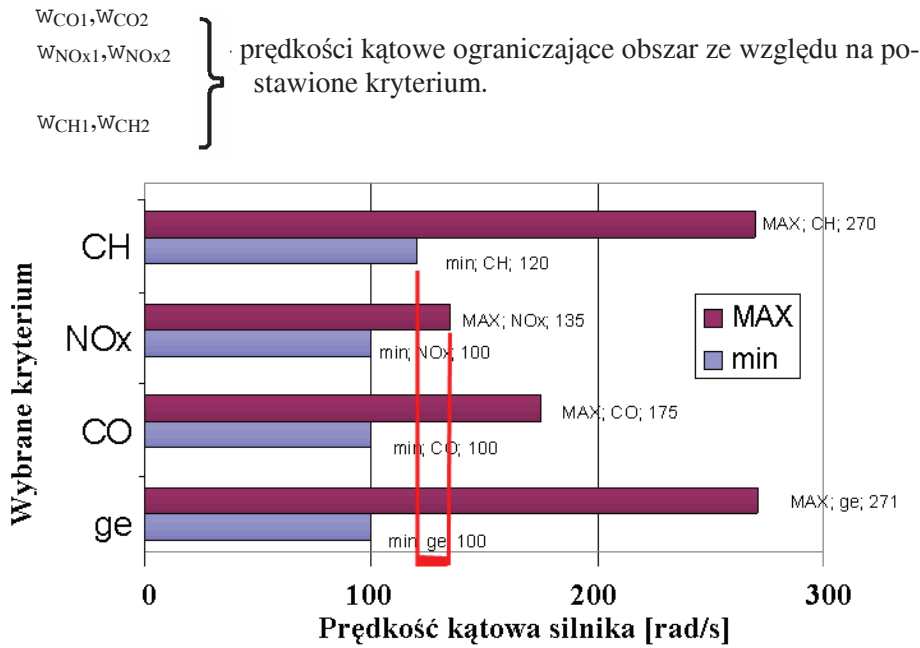
$$t_{CO}(M, \omega) \in \langle t_{CO\min}, 1.2 \cdot t_{CO\min} \rangle \Rightarrow \omega \in (\omega_{CO1}, \omega_{CO2}) \quad (7)$$

$$t_{CH}(M, \omega) \in \langle t_{CH\min}, 1.2 \cdot t_{CH\min} \rangle \Rightarrow \omega \in (\omega_{CH1}, \omega_{CH2}) \quad (8)$$

$$t_{NOx}(M, \omega) \in \langle t_{NOx\min}, 1.2 \cdot t_{NOx\min} \rangle \Rightarrow \omega \in (\omega_{NOx1}, \omega_{NOx2}) \quad (9)$$

gdzie:

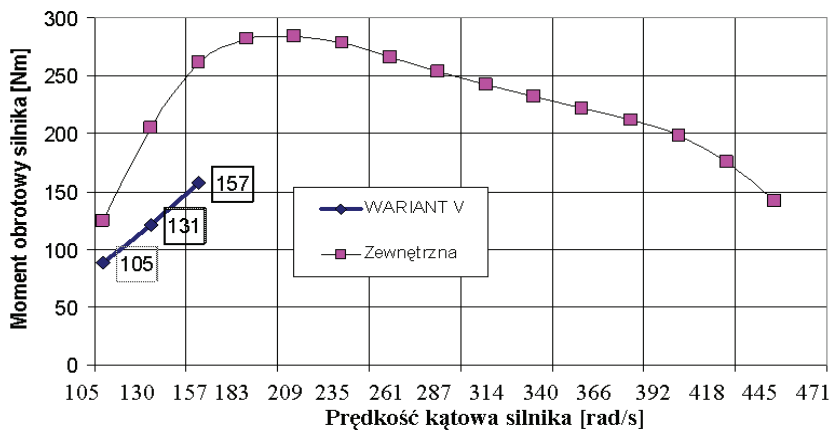
- $t_{CO}(M, \omega)$ - emisja CO [ppm]
 $t_{CH}(M, \omega)$ - emisja CH [ppm]
 $t_{NOx}(M, \omega)$ - emisja NO_x [ppm]
 $t_{CO\min}$ - minimalna emisja CO [ppm]
 $t_{NOx\min}$ - minimalna emisja NO_x [ppm]
 $t_{CH\min}$ - minimalna emisja CH [ppm]



Rys. 18. Dobór prędkości kątowej optymalnej metodą ograniczonych kryteriów.
 Fig. 18. Optimal engine angular velocity selection using trade off method.

Wyznaczono prędkość kątową $w_{opt}=140$ [rad/s], będącą częścią wspólną przedziałów wynikających z poszczególnych kryteriów, rysunek 18.

W związku z tym do dalszych obliczeń symulacyjnych przyjęto linię sterowania jak na rysunku 19, która została wyznaczona metodą kombinowaną, jak opisano powyżej; rzędne tej linii wyznaczono metodą ważonych kryteriów, natomiast odcięte metodą ograniczonych kryteriów.

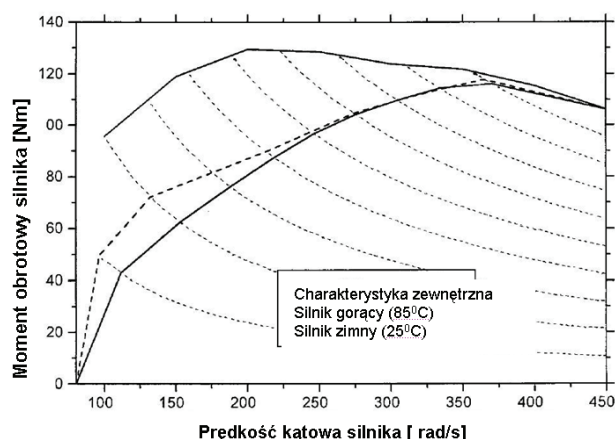


Rys. 19. Linia sterowania dla Wariantu V.
 Fig. 19. Steering line - Version V.

Na rysunku 19 przedstawiono linię sterowania dla pracy przekładni CVT przy ustalonej prędkości kątowej. Cechą znaną tej linii jest ograniczenie prędkości maksymalnej pojazdu do wartości 25 m/s.

➤ **Wariant VI- Współczynniki wag a temperatura silnika [2]**

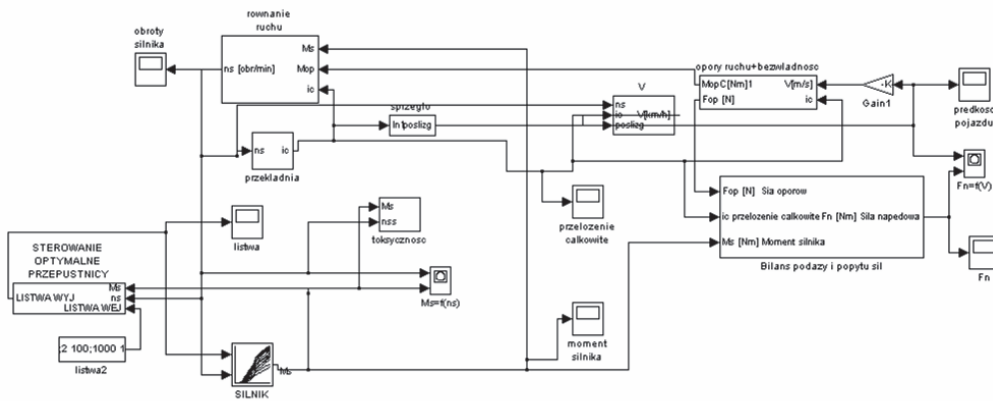
Kolejnym parametrem, który powinien uwzględniać współczynniki wag jest wpływ temperatury silnika na położenie linii optymalnej (rys. 20). Szczególnie, że wraz z wprowadzeniem normy Euro 3 zlikwidowano (40 s) okres nagrzewania silnika przed testem toksyczności spalin NEDC. Zagadnienie to będzie przedmiotem osobnego opracowania, w związku z tym obecnie jest jedynie zasygnalizowane.



Rys. 20. Wypadkowa linia optymalna silnika dla dwóch temperatur [2].
Fig. 20. Resultant optimal steering line of engine for two temperature [2].

4. Analiza wyznaczonych linii optymalnych

Do przeprowadzenia porównania zaproponowanych linii wypadkowych ze względu na wybrane kryteria, został użyty model układu napędowego z przekładnią bezstopniową CVT (rys. 21). W modelu przekładni bezstopniowej CVT nie została uwzględniona jej bezwładność.

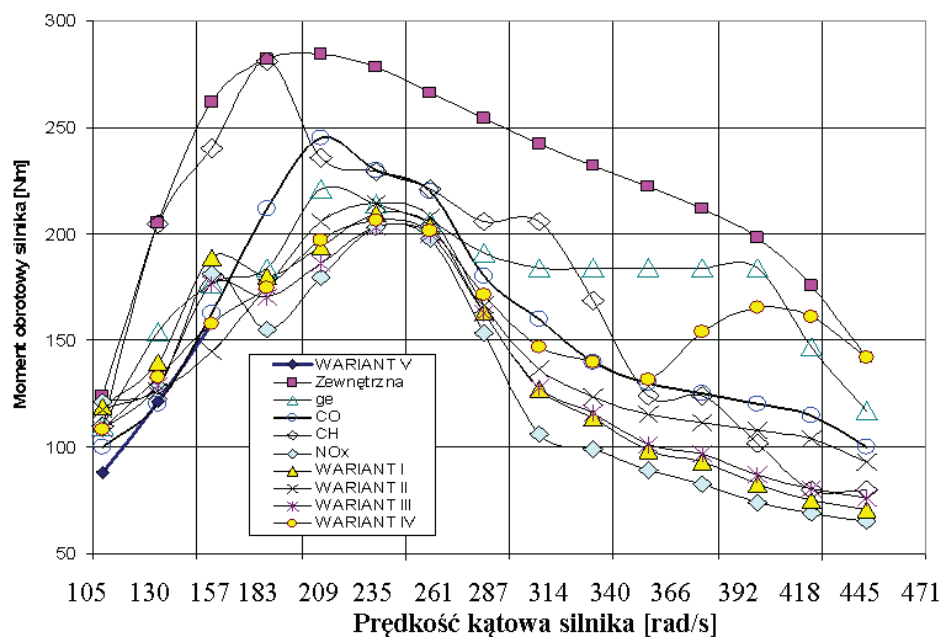


Rys. 21. Model układu napędowego z przekładnią CVT (MatLab Simulink) użyty do weryfikacji linii wypadkowych [4].

Fig. 21. Model of driving system with CVT transmission (Matlab Simulink) used to resultant steering line verification [4].

Założenia badań symulacyjnych:

- przeanalizowano wpływ poszczególnych linii sterowania (rys. 22) na następujące wielkości:
 - suma wartości chwilowych emisji toksycznych składników spalin (CO, NO_x, CH),
 - suma wartości chwilowych jednostkowego zużycia paliwa [g/kWh],
 - nieoptymalizowane zużycie paliwa podczas próby [g],
 - nieoptymalizowana droga przebyta przez pojazd podczas próby [m].
- przełożenie przekładni zmienia się w sposób ciągły w funkcji prędkości obrotowej od i_{\min} do i_{\max} ,
- czas każdej próby przyjęto 40s.



Rys. 22. Zestawienie linii sterowania silnikiem.

Fig. 22. Steering lines statement.

4.1. Wyniki badań symulacyjnych

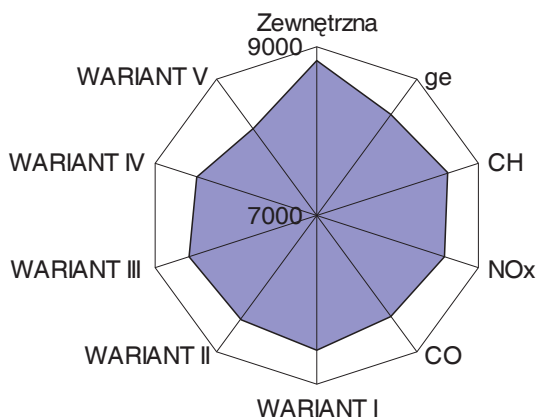
Wielkościami podlegającymi analizie są:

- suma wartości chwilowych jednostkowego zużycia paliwa g_e [g/kWh],
- suma wartości chwilowych emisji toksycznych składników spalin (CO , NO_x , CH [ppm]).

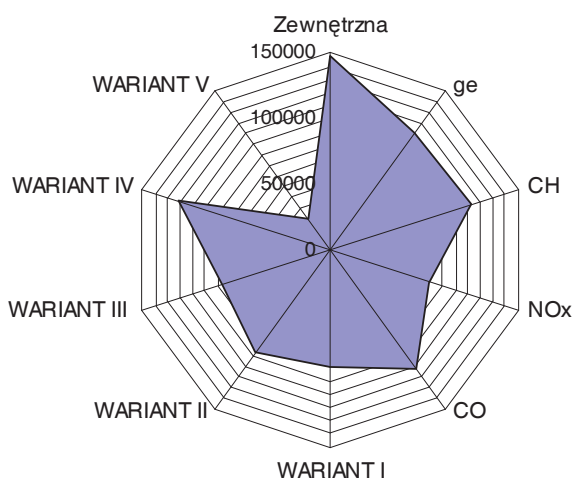
Ponadto wyznaczono dla każdej próby rozpędzania pojazdu w czasie 40s, ilość zużytego paliwa [g], drogę [m].

Na rysunkach 23 i 24 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla następujących linii optymalnych:

- g_e - linia sterowania optymalna ze względu na jednostkowe zużycie paliwa;
- CH - linia sterowania optymalna ze względu na emisję CH ,
- NO_x - linia sterowania optymalna ze względu na emisję NO_x ,
- CO - linia sterowania optymalna ze względu na emisję CO ,
- Wariant I, II, III, IV, V – linie sterowania zgodnie z ww. wariantami,
- linia sterowania odpowiadająca charakterystyce zewnętrznej silnika.

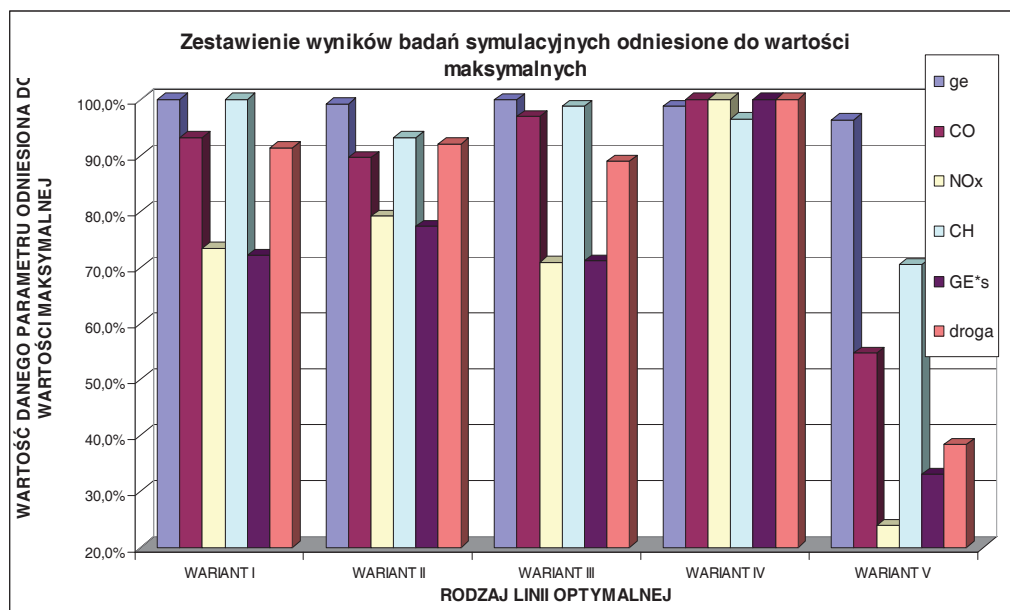


Rys. 23. Wpływ linii optymalnych na g_e [g/kWh].
Fig. 23. Influence of optimal lines for g_e [g/kWh].



Rys. 24. Wpływ linii optymalnych na emisję NO_x [ppm].
Fig. 24. Influence of optimal lines for NO_x emission [ppm].

Wyniki badań symulacyjnych unormowano przez odniesienie ich do wartości ekstremalnych z danej próby. Takie unormowanie pozwoliło na syntetyczne zestawienie wyników badań symulacyjnych (rys. 25).



Rys. 25. Zestawienie wyników badań symulacyjnych po unormowaniu.

Fig. 25. Normalized simulation results statement.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań symulacyjnych-linie jednokryterialne.

Table 5. Simulation results statement, one-objective steering lines.

	Rodzaj lini sterowania (czas próby 40s)				
	<i>Zewnętrzna</i>	<i>ge</i>	<i>CH</i>	<i>NO_x</i>	<i>CO</i>
ge [g/kWh]	8839	8469	8625	8578	8489
CO [ppm]	34492	23469	24533	25786	22337
NO _x [ppm]	147697	109239	111813	79351	111659
CH [ppm]	1448	1098	1048	1157	1076
paliwo [g]	167,3	103,2	110,8	76,21	104,5
droga [m]	4940	3719	4133	3374	3877

Tabela 6. Zestawienie wyników badań symulacyjnych-linie wielokryterialne.

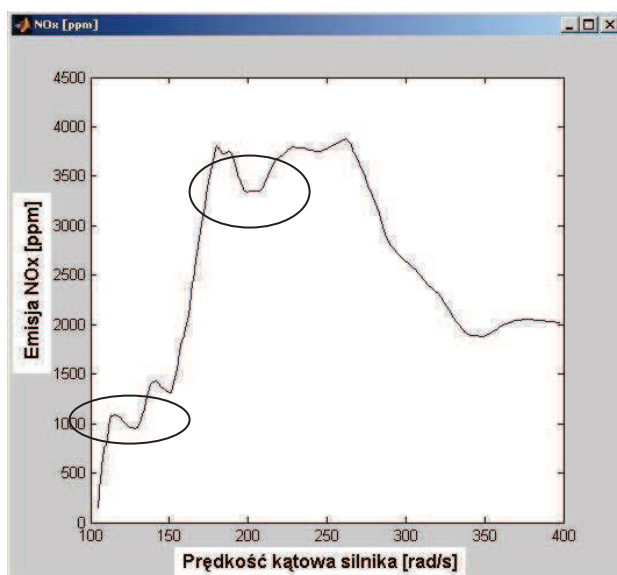
Table 6. Simulation results statement, multi-objective steering lines.

	<i>WARIANT I</i>	<i>WARIANT II</i>	<i>WARIANT III</i>	<i>WARIANT IV</i>	<i>WARIANT V</i>
Ge [gkWh]	8593	8524	8586	8488	8279
CO [ppm]	24448	23523	25432	26241	14354
NO _x [ppm]	89186	96150	86101	121461	29005
CH [ppm]	1175	1095	1161	1134	828
paliwo [g]	85,13	91,21	83,97	118	39
droga [m]	3561	3586	3466	3897	1495

4.2. Analiza wyników badań symulacyjnych

Z przeprowadzonej analizy (rys. 23-25, tab. 5 i 6) wynikają następujące wnioski:

- Analiza g_e [g/kWh] - jednostkowego zużycia paliwa potwierdza spostrzeżenie, że charakterystyka uniwersalna tej wielkości jest dla tego silnika bardzo płaska, (rys. 1). Słuszne jest więc przyjęcie małego (30%) współczynnika wagi tej wielkości w procedurach polioptymalizacyjnych - Wariant IV. W przypadku charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa z bardziej widocznym minimum, współczynnik wagi tego kryterium można zwiększyć. Proponowany algorytm wyznaczania linii sterowania umożliwia wyższą zmianę.
- Jak wiadomo, zużycie paliwa przy płaskiej charakterystyce silnie zależy od mocy chwilowej. W związku z tym linie sterowań, dla których silnik uzyskuje mniejszą sumaryczną moc chwilową zapewniają niższe zużycie paliwa (praca układu wg linii charakterystyki zewnętrznej powoduje zużycie paliwa 167 g, a linia „NO_x” jedynie 76 g).
- Droga przebyta przez pojazd silnie zależy od zapasu momentu obrotowego. W związku z tym, wraz ze wzrostem średniej wartości zapasu momentu obrotowego wzrasta droga przebyta przez pojazd - rys. 24 (praca układu wg linii charakterystyki zewnętrznej zapewnia drogę 4950m, natomiast linia Wariant V jedynie 1500 m).
- *Wariant III* w porównaniu z Wariantem I jest korzystniejszym rozwiązaniem.
- *Wariant II*, ze względu na przyjęte współczynniki wag (rys. 7), zapewnia niską emisję CO i NO_x. Jednocześnie położenie linii optymalnej ze względu na to kryterium względem pozostałych linii zapewnia uzyskanie dobrych wyników dla analizowanych wielkości.
- *Wariant III* zapewnia najmniejszą wartość emisji NO_x, (rys. 25), mającej decydujący wpływ na szkodliwość spalin układu napędowego z silnikiem 1.9 TDI (AJM). Badania symulacyjne potwierdzają słuszność przyjęcia 81% wagi emisji NO_x a także uwzględnienia normy emisji spalin Euro 3. Przyjęta koncepcja sprawdzająca w Wariacie III, umożliwiła „poprawienie” linii optymalnej dla NO_x, co zapewniło polepszenie sumy wartości chwilowych tej wielkości o około 3%.
Analiza obszaru sterowania wynikającego z normy Euro 4 (linia 2 g/kWh na rysunku 14) wskazuje, że zastosowanie przekładni CVT dające możliwość rozpędzania pojazdu przy stałej prędkości kątowej silnika, może zapewnić spełnienie normy Euro 4 przez pojazd.
- *Wariant IV*, jak było do przewidzenia, nie zapewnia najniższych wartości analizowanych wielkości. Linie te są propozycją, która dopiero po opracowaniu statystycznym rzeczywistego ruchu pojazdu, da możliwość swej weryfikacji.
- *Wariant V*, zapewnia minimalną emisję analizowanych składników spalin, jednakże ogranicza prędkość maksymalną pojazdu do 25 m/s.



Rys. 26. Przebieg wartości chwilowych emisji NO_x [ppm] (obciążenie około 50%).

Fig. 26. Instantaneous NO_x [ppm] emission course (aprox. 50% charge).

Jak wynika z rysunku 26, dla prędkości kątowej silnika o wartości 157 [rad/s] występuje wzrost emisji NO_x, (obszar najmniejszej emisji NO_x na rysunku 3). Można przypuszczać, że na kształt charakterystyki uniwersalnej emisji NO_x mogły mieć wpływ normy emisji spalin. Obszar obciążeń silnika wynikający z typowych testów toksyczności spalin w dużej części pokrywa się z polem minimalnej emisji NO_x. Ponadto warto zauważyć, że w obszarze maksymalnego momentu obrotowego występuje maksymalna emisja NO_x.

Z powyższej analizy wynika, że należałoby wprowadzić następujący algorytm sterowania przekładnią bezstopniową:

- Faza I - zapewnienie pracy układu silnika z prędkością obrotową 140 rad/s w jak najszerszym zakresie aż do momentu osiągnięcia przez przekładnię CVT przełożenia minimalnego.
- Faza II - warunki początkowe: prędkość obrotowa 140 rad/s, przełożenie przekładni CVT minimalne. Proces rozpędzania można zrealizować przez zwiększanie prędkości obrotowej silnika. Czas pracy silnika w tym zakresie powinien być możliwie krótki, ponieważ wzrost prędkości obrotowej silnika wiąże się z przejściem przez ekstremum emisji NO_x.
- Faza III - utrzymanie prędkości obrotowej silnika przy wartości odpowiadającej drugiemu minimum (lokalnemu) emisji NO_x. (około 250 rad/s, rys. 26).

Realizację powyższego algorytmu sterowania zapewnia zintegrowany układ napędowy: silnik - przekładnia bezstopniowa z nadrzędnym układem sterującym.

- Optymalizacja metodą ważonych kryteriów umożliwia optymalizację wielokryterialną, łącznie z wielopoziomowymi podsystemami współczynników wag (Wariant IV).

Optymalizacja metodą ograniczonych kryteriów umożliwia optymalizację wielokryterialną z uwzględnieniem obszarów optymalnych ze względu na poszczególne kryteria. Wynikiem optymalizacji jest część wspólna poszczególnych obszarów optymalnych.

Wariant V pokazuje, iż możliwe jest łączenie dwóch powyższych metod.

Przedstawiony algorytm otrzymywania linii optymalnych sterowania silnikiem zintegrowanego układu napędowego z przekładnią CVT, z użyciem programu MatLab Simulink, zapewnia możliwość łatwego wykluczenia obszaru sterowań niekorzystnych. Proponowane algorytmy wyznaczania linii sterowania umożliwiają zmianę współczynników wag w zależności od:

- optymalizowanego silnika (każdemu silnikowi przypisana jest indywidualna charakterystyka uniwersalna),
- obowiązujących norm emisji spalin,
- dodatkowych kryteriów, np. rodzaj pojazdu (limuzyna - wymagany komfort, sportowy- wymagana dynamika, miejski-wymagana minimalna emisja spalin).

Literatura

1. BERNHARDT M., MICHAŁOWSKI J., RADZIMIRSKI ST.: *Motoryzacyjne skażenie powietrza*. WKiŁ Warszawa 1976.
2. BRACE C.J., DEACON M., VAUGHAN N.D., BURROWS C.R.: *Operating point optimizer for integrated diesel CVT powertrain*. Application of Powertrain and Fuel Technologies to Meet Emissions Standards for the 21st Century, Seminar code C517, June 1996.
3. NIKIEL G.: *Optymalizacja wielokryterialna w projektowaniu procesów wytwarzania-wybrane zagadnienia* (Raport z badań własnych). ATH Bielsko-Biała 2004, www.ath.bielsko.pl/~gnikiel/publik/optym.pdf.
4. PAŁCZYŃSKI T.: *Badania symulacyjne układu napędowego z przekładnią CVT*. Praca Dyplomowa, Instytut Pojazdów PŁ, czerwiec 2002.
5. <http://www.infobus.com.pl/text.php?id=2796>
6. <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.html>

Engine optimal steering lines

S u m m a r y

Definition of engine optimal steering lines provides that integrated driveline works in optimal steering areas. Thanks to proposed optimization procedure unfavorable areas can be easily excluded, other criteria may be taken into consideration (silent-running of engine). Optimization was made using MatLab Simulink, Simulink Response Optimization: Signal Constraint.