



Właściwości trakcyjne gąsienicowego wozu bojowego przy obniżonej mocy silnika napędowego

WACŁAW BORKOWSKI, PIOTR RYBAK, BOGUSŁAW MICHAŁOWSKI,
JÓZEF WYSOCKI, ZDZISŁAW HRYCIÓW

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Współczesne i przyszłe pole walki charakteryzować się będzie dużą dynamiką działań zarówno w działaniach obronnych, jak i zaczepnych. Może się zdarzyć, że nie zawsze do pododdziałów pancernych i zmechanizowanych działających w pierwszym rzucie dotrze zaopatrzenie materiałowo-techniczne. Dotyczy to szczególnie paliwa do silników napędowych pojazdów. Dlatego też w wielu wypadkach do ich zasilania (jako silników wielopaliwowych lub przystosowanych do pracy na paliwach zastępczych) wykorzystywane może być paliwo zastępcze. Paliwo, którego parametry niekiedy znacznie różnią się od parametrów oleju napędowego. Istotne jest zatem, aby przy planowaniu zadań bojowych móc oszacować ich dynamikę. W pracy podjęto próbę oszacowania właściwości dynamicznych pojazdu przy zasilaniu paliwami zastępczymi. Przedstawiono wyniki obliczeń trakcyjnych gąsienicowego wozu bojowego oraz wpływ zasilania silnika paliwem odnawialnym na jego ruchliwość.

Słowa kluczowe: ruchliwość, gąsienicowy wóz bojowy, czołg podstawowy, paliwo odnawialne, charakterystyka trakcyjna

Symbol UKD: 623.438.3

1. Wprowadzenie

Doświadczenia minionych i aktualnych konfliktów zbrojnych, pomimo różnych opinii, potwierdzają tezę, że gąsienicowe wozy bojowe (czołgi i bojowe wozy piechoty) są w dalszym ciągu podstawowym środkiem walki wojsk lądowych przeznaczonym do wykonywania zadań ofensywnych jak i defensywnych w różnych warunkach terenowych, klimatycznych i meteorologicznych. Efektywność wozu bojowego charakteryzują jego trzy podstawowe właściwości:

- siła ognia,
- opancerzenie,
- ruchliwość.

Dwie pierwsze cechy bojowe (siła ognia i opancerzenie) są uwarunkowane przede wszystkim założeniami konstrukcyjnymi wozu bojowego i w czasie eksploatacji nie ulegają w zasadzie zmianie (pomijając zmiany wynikające ze stanu technicznego uzbrojenia, systemu kierowania ogniem, układów zabezpieczenia itp.).

Pod pojęciem ruchliwości rozumiemy zespół cech charakteryzujących zdolność manewrowania wozu bojowego na polu walki w różnych warunkach terenowych, opisujących właściwości trakcyjne pojazdu. Jako najistotniejsze z tych cech należy wymienić: parametry charakteryzujące ruch prostoliniowy, zwrotność, zdolność pokonywania terenu (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Wozy bojowe podczas jazd terenowych (fot. M. Dąbrowski)

Wysoka ruchliwość wozu bojowego decyduje o tempie wykonania zadań bojowych. Jest ona również nierozzerwalnie związana z pozostałymi cechami bojowymi (siłą ognia oraz opancerzeniem). Im większą ruchliwość posiada wóz bojowy, tym stanowi trudniejszy cel dla środków ogniowych przeciwnika, szybciej przekracza niebezpieczne odcinki oraz ma większe możliwości wykorzystania naturalnych osłon terenowych. Osiągnięcie wysokiej ruchliwości wozu bojowego zależy od wielu czynników począwszy od konstrukcji silnika, układu napędowego i jezdnego poprzez systemy dowodzenia aż do warunków pracy i umiejętności mechanika–kierowcy. Najważniejsze z nich są jednak parametry układu napędowego oraz gąsienicowego układu jezdnego, a w tym:

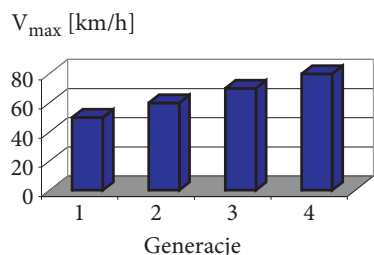
- wskaźnik mocy jednostkowej, średni nacisk jednostkowy, przyczepność gąsienic do gruntu,
- właściwości układu napędowego umożliwiające optymalne wykorzystanie mocy silnika, zapewniające uzyskanie wymaganej rozpiętości sił napędowych i prędkości jazdy,
- właściwości mechanizmów skrętu zapewniające dużą zwrotność pojazdu, dużą prędkość kątową realizacji skrętu, płynne wejście w skręt i przejście do ruchu prostoliniowego,
- parametry konstrukcyjne gąsienicowego układu jezdnego opisujące zdolność do poruszania się w trudnych warunkach terenowych, w zakresie pełnego wykorzystania przyczepności gąsienic do podłoża,
- jakość mechanizmów kierowania pojazdem.

O tym, że w sposób ciągły dąży się do podwyższenia parametrów charakteryzujących ruchliwość gąsienicowych wozów bojowych, świadczą tendencje rozwojowe obserwowane na przestrzeni lat, w poszczególnych generacjach czołgów powojennych wg następującego podziału:

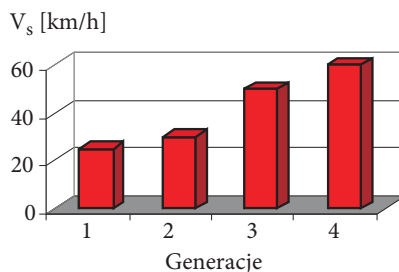
1. I generacja, koniec drugiej wojny światowej do roku 1960;
2. II generacja, lata 1960-1980, z tzw. okresem przejściowym w latach 1970-1980;
3. III generacja obejmująca lata 1980-2000;
4. IV przyszłościowa generacja obejmująca lata po roku 2000.

Niektóre z parametrów zaprezentowano na rysunkach 1.2-1.6.

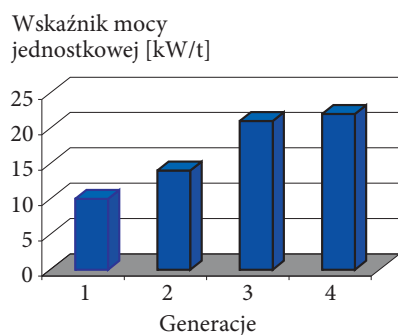
Dla danego typu wozu bojowego wymienione wyżej cechy konstrukcyjne są ustalone poprzez warunki techniczne na etapie projektowania lub modernizacji. W trakcie eksploatacji (pomijając stan techniczny układu przenoszenia energii od silnika do kół napędowych) może zmieniać się jedynie moc jednostkowa silnika w wyniku zasilania go różnymi paliwami. Problematyka zasilania silników spalinowych paliwem alternatywnym rozwijana jest od wielu lat. Przegląd literatury przedmiotu wskazuje, że badania ukierunkowane są głównie na analizę procesów roboczych silnika oraz problemy ekologiczne. Poruszane są również aspekty ekonomiczne oraz społeczne stosowania paliw alternatywnych, szczególnie na bazie



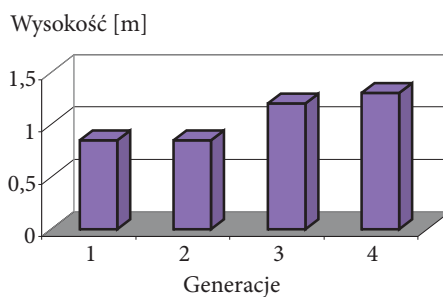
Rys. 1.2. Maksymalna prędkość jazdy czołgów poszczególnych generacji



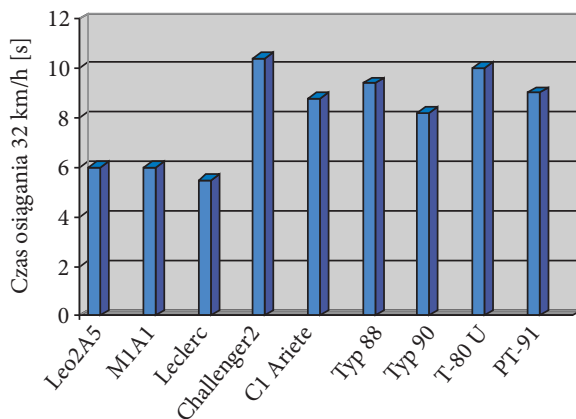
Rys. 1.3. Średnia prędkość jazdy w terenie



Rys. 1.4. Wskaźnik mocy jednostkowej czołgów



Rys. 1.5. Wysokość pokonywanej ścianki pionowej



Rys. 1.6. Czasy rozpędzania współczesnych czołgów od 0 do 32 km/h

oleju rzepakowego. Publikowane rezultaty badań wykazują, że stosowanie paliw odnawialnych prowadzi, na ogół, do zmniejszenia mocy silnika. Wpływ tego faktu na właściwości trakcyjne pojazdu nie znajduje zbyt szerokiego odzwierciedlenia w badaniach. Celem pracy jest częściowe wypełnienie tej luki. Przedmiotem analizy jest czołg podstawowy PT-91 Twardy, którego sylwetkę prezentuje rysunek 1.7.



Rys. 1.7. Czołg PT-91 Twardy — na postoju (z trałem) i podczas jazdy [7]

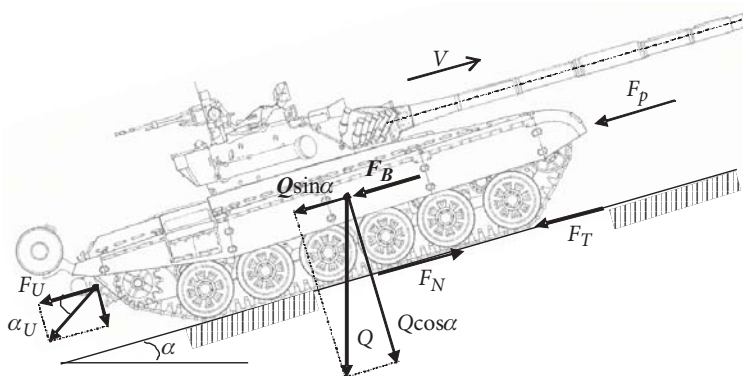
Wykorzystując podstawy teorii ruchu pojazdów gąsienicowych, zbadano wpływ zmiany charakterystyki zewnętrznej silnika (w wyniku zasilania paliwem alternatywnym) na podstawowe właściwości trakcyjne czołgu.

2. Równania teorii ruchu pojazdu gąsienicowego

2.1. W ruchu prostoliniowym

W ogólnym wypadku na pojazd gąsienicowy będący w ruchu działają siły (rys. 2.1), dla których równanie bilansu w ruchu prostoliniowym ma postać:

$$F_N - F_T - F_W - F_P - F_B - F_U = 0. \quad (2.1)$$



Rys. 2.1. Schemat sił działających na gąsienicowy wóz bojowy

Siły w równaniu (2.1) są definiowane jako:

— siła napędowa

$$F_N = \frac{M_s i_c \eta_m \eta_g}{r_k} \quad (2.2)$$

— siła oporu toczenia (przy założeniu, że siła na haku holowniczym jest równoległa do powierzchni podłoża) $F_T = Nf = Qf \cos \alpha$ (2.3)

— siła oporu wzniesienia $F_W = Q \sin \alpha$ (2.4)

— siła oporu powietrza $F_P = 0,5 C_x \rho A V_w^2$ (2.5)

— siła bezwładności $F_B = \delta \frac{Q}{g} \frac{dV}{dt}$ (2.6)

— siła uciągu (holowania) F_U wynika z masy i oporów ruchu holowanej przyczepy.

Poszczególne zmienne we wzorach (2.2)-(2.6) opisują: M_s — moment obrotowy na wale korbowym silnika; i_c , η_m — przełożenie całkowite oraz sprawność układu napędowego; η_g — sprawność zespołu gaśnicowego; r_k — promień koła napędowego; Q — siłę ciężkości pojazdu; f — współczynnik oporu toczenia; α — kąt nachylenia nawierzchni drogi (wzniesienia); ρ — gęstość powietrza; A — pole przekroju poprzecznego pojazdu; V_w — prędkość względną pojazdu i powietrza; V — prędkość pojazdu; δ — współczynnik mas zredukowanych (uwzględniający opory bezwładności mas wirujących układu napędowego i mechanizmu gaśnicowego).

Uwzględniając definicję sił, równanie ruchu prostoliniowego pojazdu przyjmie postać

$$\delta \frac{Q}{g} \frac{dV}{dt} + 0,5 C_x \rho A V_w^2 = \frac{M_s i_c \eta_m \eta_g}{r_k} - Qf \cos \alpha - Q \sin \alpha - F_u. \quad (2.7)$$

W celu określenia lub porównania właściwości trakcyjnych różnych pojazdów sporządza się charakterystykę dynamiczną zdefiniowaną jako

$$D = D(V) = \frac{F_N - F_P}{Q} = \frac{1}{Q} \left(\frac{M_s i_c \eta_m \eta_g}{r_k} - 0,5 C_x \rho A V_w^2 \right), \quad (2.8)$$

gdzie D nosi nazwę wskaźnika dynamicznego. Dla pojazdów gaśnicowych rozwijających małe prędkości jazdy (do ok. 70 km/h) siłę oporu powietrza można pominąć. A zatem wskaźnik dynamiczny jest w przybliżeniu równy jednostkowej sile napędowej. Uwzględniając (2.8) równanie (2.7) można zapisać w postaci

$$D = f \cos \alpha + \sin \alpha + \frac{\delta}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{F_u}{Q}. \quad (2.9)$$

Z zależności (2.9) wynika, że znajomość charakterystyki dynamicznej pozwala w dogodny sposób na określenie lub porównanie podstawowych właściwości trakcyjnych pojazdów, w tym:

- prędkości jazdy dla danego przełożenia układu oraz danych warunków drogowych,
- zdolności do pokonywania wzniesień,
- zdolności do holowania przyczepy (lub innego pojazdu np. uszkodzonego),
- wartości przyspieszeń dla danych przełożeń i warunków drogowych,
- czas i drogę rozbiegu.

Cztery pierwsze parametry określa się bezpośrednio z równania (2.9), natomiast czas i drogę rozbiegu z zależności

$$t = \int_{V_0}^V \frac{g}{\delta} \frac{dV}{D(V) - f}, \quad (2.10)$$

$$S = \int_{t_0}^t V dt, \quad (2.11)$$

przyjmując założenie, że $\alpha = 0$ i $F_U = 0$. Przy określaniu właściwości trakcyjnych pojazdu należy uwzględnić możliwość ograniczenia siły napędowej, a więc i wskaźnika D , przez siły przyczepności do gruntu.

2.2. Realizacja skrętu (ruch krzywoliniowy)

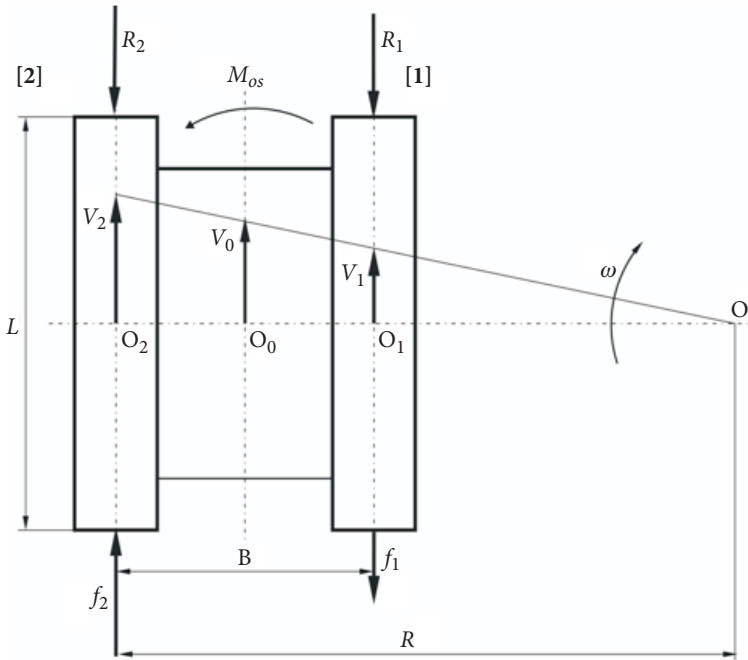
Dla określenia lub porównania zwrotności pojazdu gąsienicowego sporządza się charakterystyki skrętu. Charakterystyką skrętu jest wykres potrzebnej przy skręcie jednostkowej siły napędowej f_p na gąsienicy wyprzedzającej w funkcji promienia skrętu. Danymi wyjściowymi do sporządzenia charakterystyki są siły jednostkowe występujące na gąsienicach (rys. 2.2) określone jako

$$f_2 = 0,5f + \frac{\mu L}{4B} \quad (2.12)$$

$$f_1 = -0,5f + \frac{\mu L}{4B} \quad (2.13)$$

$$\mu = \frac{\mu_m}{a + (1-a)\frac{R}{B}}, \quad (2.14)$$

gdzie: f_1, f_2 — siły jednostkowe (wskaźniki sił jednostkowych) na gaśnienicy pozostającej i zabiegającej $f_i = \frac{F_i}{G_p}$ (gdzie F_i — siła napędowa uogólniona, G_p — siła ciężkości pojazdu);
 μ — współczynnik oporu skrętu;
 μ_m — największa wartość współczynnika μ przy skręcie z promieniem $R = B$;
 R — promień skrętu;
 L — długość styku dolnej gałęzi gaśnienicy z podłożem;
 B — rozstaw osi gaśnienic;
 a — współczynnik zależny od rodzaju i stanu gruntu, $a = (0,8-0,87)$;
 f — współczynnik oporu toczenia.



Rys. 2.2. Siły działające na pojazd przy skręcie, gdzie: R_i — siły oporu na gaśnienicach; M_{os} — moment oporu skrętu

Sposób wyznaczenia potrzebnej do skrętu jednostkowej siły napędowej f_p zależy od typu mechanizmu skrętu. Problematyka jest szczegółowo opisana w literaturze [1, 2].

3. Wpływ zasilania silnika paliwem odnawialnym na właściwości trakcyjne gąsienicowego wozu bojowego

Problem badawczy analizowano dla pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (ZS), o parametrach eksploatacyjnych zbliżonych do czołgu PT-91. Nie dysponując charakterystyką zewnętrzną silnika przy zasilaniu paliwami alternatywnymi przyjęto, na podstawie dostępnych danych literaturowych [3, 4, 5, 6], że jego moc maksymalna (a szczególnie maksymalny moment obrotowy) jest o ok. 8 do 9% mniejsza niż przy zasilaniu olejem napędowym.

Niezbędne dane do sporządzenia charakterystyki trakcyjnej (parametry techniczno-konstrukcyjne pojazdu) zestawiono w tabeli 3.1.

TABELA 3.1

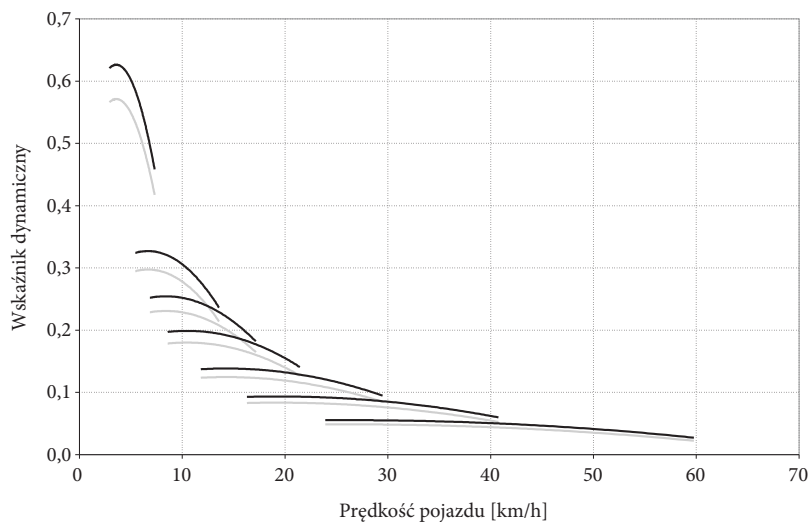
Dane wyjściowe do obliczeń

Lp.	Parametr	Wartość
1	Masa bojowa [t]	45
2	Moc maksymalna/prędkość obr. [kW]/[obr/min]	625/2200
3	Moment maksymalny/prędkość obr. [Nm]/[obr/min]	3150/1350
4	Przełożenie przekładni wstępnej	0,706
5	Przełożenia skrzyni na biegach: 1-7	$i_1 \dots i_7$
6	Przełożenie przekładni bocznej	5,454
7	Liczba zębów koła napędowego	14
8	Podziałka gąsienicy [m]	0,137
9	Współczynnik sprawności układu napędowego	0,85-0,9
10	Współczynnik sprawności mechanizmu gąsienicowego	η_g

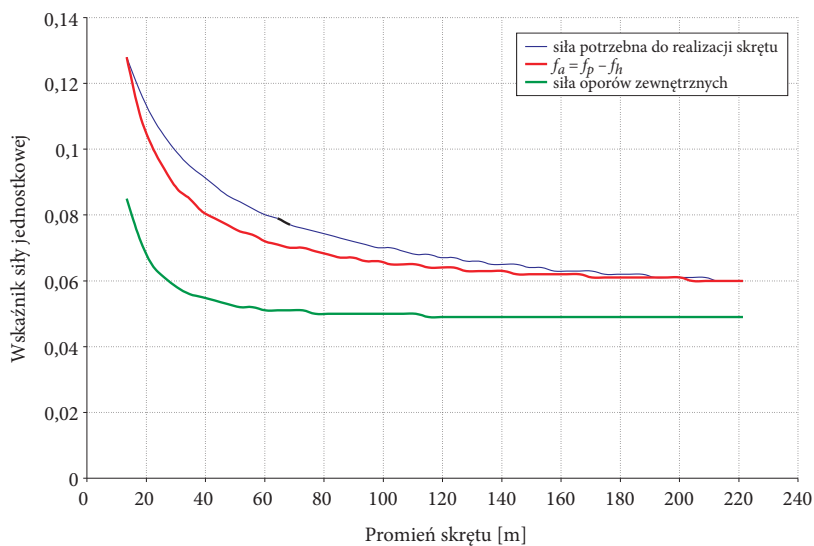
gdzie:
$$\eta_g = 0,95 - \frac{1}{f_k} (0,025 + 0,000003 V^2).$$

Charakterystykę dynamiczną skrętu oraz rozbiegu obliczono przy wykorzystaniu opracowanych w Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu WME WAT programów numerycznych: CHARDYN, CHSK oraz ROZBIEG. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rysunkach 3.1-3.3.

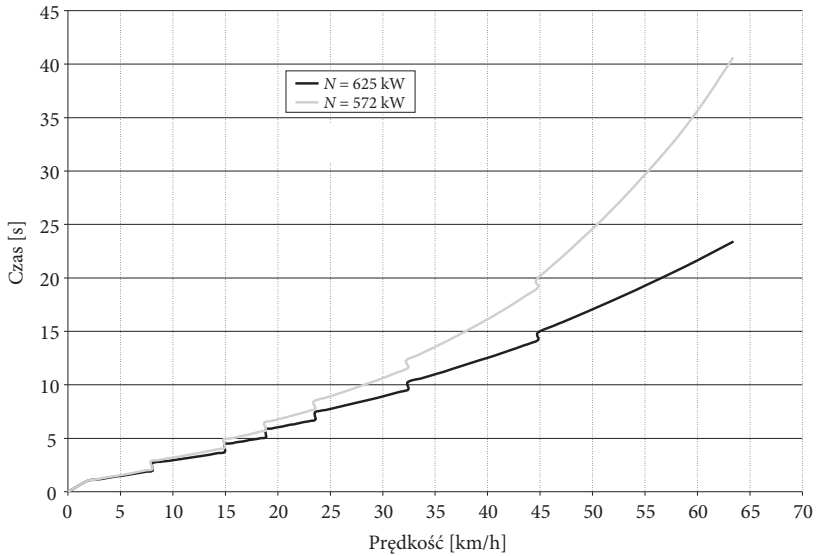
Określone na podstawie uzyskanych charakterystyk parametry, które opisują właściwości trakcyjne wozu bojowego, zestawiono w tabeli 3.2.



Rys. 3.1. Charakterystyka dynamiczna pojazdu zasilanego olejem napędowym (linia ciemna), paliwem odnawialnym (linia jasna)



Rys. 3.2. Charakterystyka skrętu pojazdu



Rys. 3.3. Charakterystyka rozbiegu pojazdu zasilanego olejem napędowym (linia ciemna), paliwem odnawialnym (linia jasna)

TABELA 3.2

Parametry charakteryzujące właściwości trakcyjne pojazdu

Lp.	Parametry charakterystyczne		Wartość parametru dla pojazdu zasilanego		Różnica [%]
			olejem napędowym	paliwem odnawialnym	
1	Maksymalny wskaźnik dynamiczny D:	I biegu	0,626	0,570	~9
2		II biegu	0,327	0,300	~9
3		III biegu	0,254	0,231	~9
4		IV biegu	0,20	0,18	~10
5	Największa prędkość jazdy dla oporów ruchu $f = D_{PO} V$ [km/h]	I biegu	5,74	3,84	31
6		II biegu	10,80	7,34	32
7		III biegu	13,40	8,92	~34
8		IV biegu	16,7	11,3	~32
9	Maks. prędkość dla oporów ruchu $f = 0,003$ V_{kmax} [km/h]		58,3	54,4	~7
10	Maks. kąt wzniesienia przy M_{smax}		34°30'	31°	12
11	Maks. kąt wzniesienia przy N_{smax}		23°25'	21°	12
12	Czas rozbiegu [s] od 0 do 32 km/h		9,4	11,3	~17

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Rezultaty obliczeń wskazują, że zasilanie silnika paliwem odnawialnym może mieć wpływ na: ruchliwość wozu bojowego, pewność wykonywanych zadań, zdolność przeżycia załogi.

Średni spadek mocy silnika o około 8,5% powoduje:

- zmniejszenie wskaźnika dynamicznego średnio o ok. 9%,
- obniżenie maksymalnej prędkości jazdy na poszczególnych biegach (przy przyjętych) oporach ruchu przeciętnie o ok. 32%,
- zmniejszenie maksymalnej prędkości jazdy na asfalcie o ok. 7%,
- zmniejszenie zdolności pokonywania wzniesień o 12%, przy wymaganych dla rozpatrywanej klasy pojazdów 35°,
- pogorszenie zrywności, wydłużenie czasu osiągnięcia prędkości 32 km/h z postoju, o ok. 17% (zmniejsza się skuteczność tzw. obrony czynnej),
- nie ma wpływu na skręt na poziomej nawierzchni, ponieważ parametry skrętu zależą od masy pojazdu, wymiarów oraz właściwości mechanicznych podłoża. Pogarszają się natomiast warunki i dynamika skrętu na stokach, wzniesieniach.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2009 r.

LITERATURA

- [1] Z. BURDZIŃSKI, *Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego*, WKiŁ, Warszawa, 1972.
- [2] W. BORKOWSKI, S. KONOPKA, L. PROCHOWSKI, *Dynamika maszyn roboczych*, WNT, Warszawa, 1996.
- [3] W. BORKOWSKI, B. MICHAŁOWSKI, P. RYBAK, *Właściwości trakcyjne wozu bojowego przy obniżonej mocy silnika*, VI Sympozjum N-T: „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych”, SILWOJ’03, Jurata, 2003.
- [4] W. BORKOWSKI, J. FIGURSKI, T. KAŁDOŃSKI, B. MICHAŁOWSKI, P. RYBAK, *Właściwości trakcyjne wozu bojowego przy zasilaniu silnika paliwami odnawialnymi*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, 155, Mechanika, 25, 2003.
- [5] W. BORKOWSKI, B. MICHAŁOWSKI, P. RYBAK, *Charakterystyki wozu bojowego przy zasilaniu paliwami odnawialnymi*, Archiwum Motoryzacji, 7, 3, 2004.
- [6] W. BORKOWSKI, P. RYBAK, B. MICHAŁOWSKI, J. WYSOCKI, Z. HRYCIÓW, *Traction properties of the tracked combat vehicle at lowered power of the driving engine*, Journal of Kones, 16, 1, 2009.
- [7] <http://images.google.com, pl.wikipedia.org>

W. BORKOWSKI, P. RYBAK, B. MICHAŁOWSKI,
J. WYSOCKI, Z. HRYCIÓW

Traction features of tracked combat vehicle with decreased engine power

Abstract. Modern and future battle field will be characterized by high dynamics of operations, both defensive and offensive ones. It is possible, that armoured troops of the first attack will suffer from shortages of supplies of materials and other equipment, especially propellants. That is why, in many cases, it is practised to adapt engines to various fuels. Substitute propellants, as a rule, have lower combustion features and they demand special treatment, e.g., aviation petrol in diesel engines. It is substantially important to know the influence of substitutes on the dynamics of vehicles. The paper describes the attempt to estimate dynamic features of combat vehicles using substitute propellants. The results of traction calculations of tracked combat vehicle were shown and impact of powering with renewable fuel on the vehicle mobility was presented.

Keywords: mobility, tracked combat vehicle, main battle tank, renewable fuel, drive characteristic

Universal Decimal Classification: 623.438.3

