

Maciej KOZŁOWSKI

WYBRANE ZAGADNIENIA MODELOWANIA KOSZTU BUDOWY UKŁADU NAPĘDOWEGO POJAZDU TRAKCYJNEGO

STRESZCZENIE *Przedstawiono sposób wyznaczania kosztów budowy układu napędowego dla pojazdów napędzanych trakcyjnymi silnikami asynchronicznymi. Uwzględniono koszty budowy silników oraz koszty budowy przekształtnika. Założono, że przy określonym poziomie techniki i ustalonym sposobie chłodzenia, koszt silnika zależy od objętości elementów czynnych, a koszt budowy przekształtnika - od sposobu doboru jego elementów. Określono zależność kosztów budowy od podstawowych parametrów technicznych układu napędowego. Przedstawiono funkcję powiązań między minimalnym kosztem budowy układu, a warunkami ruchu. Uwzględniono błędy metody obliczeniowej. Przedstawiono odpowiednie modele matematyczne opisujące przebieg jazdy optymalnej pojazdu oraz zakresy pracy układu napędowego. Przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń ilustrujących zastosowanie modeli dla warunków ruchu charakteryzujących tramwaj.*

dr inż. Maciej KOZŁOWSKI

Wydział Transportu
Politechnika Warszawska
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

1. WSTĘP

Według danych Instytutu Elektrotechniki [5], w kraju eksploatowanych jest obecnie ponad 4000 tramwajów i ponad 1000 lokomotyw i jednostek trakcyjnych. Około 2000 tramwajów oraz 400 lokomotyw nie spełnia ogólnie przyjętych na świecie standardów nowoczesności napędu. Przewidywana roczna liczba zamówień ze strony przedsiębiorstw komunikacyjnych w Polsce to ok. 150 tramwajów i ok. 20 lokomotyw oraz 10-20 zespołów trakcyjnych. Część tych zamówień przypadnie zapewne na rozwiązania układowe zawierające silniki asynchroniczne.

Do elementów technicznych światowego poziomu napędu zaliczają się: silniki z izolacją klasy „F” i „H”, energoelektroniczne układy regulacyjne, automatyzacja sterowania i ruchu oraz diagnostyka. Charakterystyczną cechą pojazdów wykonanych zgodnie z tym poziomem techniki jest całkowicie płynna i energooszczędna regulacja prędkości jazdy. Z tego względu na świecie obserwuje się prawie całkowity zanik zainteresowania klasycznymi tzn. bezprzekształtnikowymi rozwiązaniami układowymi. Większość zamówień na nowe środki transportu lub modernizację starych układów napędowych obwarowane jest zastrzeżeniem zastosowania najbardziej nowoczesnych rozwiązań układowych [23]. Stosunkowo często wymaga się zastosowania silników asynchronicznych jako napędu głównego. Silniki asynchroniczne, ze względu na brak komutatora, są mniejsze od maszyn prądu stałego o porównywalnej mocy. Stosuje się je w pojazdach, gdy w konstrukcji wózków silnikowych istotna jest objętość maszyny. W chwili obecnej znajdują zastosowanie przede wszystkim w konstrukcjach tramwajów niskopodłogowych lub lokomotyw dużej mocy.

Zastosowanie maszyny asynchronicznej do napędu głównego wymaga zastosowania przekształtnika statycznego. Mimo wzrostu zainteresowania tego typu rozwiązaniem, nie jest jeszcze należycie dostrzegany problem doboru podstawowych parametrów technicznych tego typu napędu dla wymaganych zadań trakcyjnych. Parametry ruchowe tego typu napędu kształtujące jego właściwości użytkowe, zależą nie tylko od mocy (którą w tym przypadku należy traktować jako jedną z wielu niewiadomych), a od większej liczby parametrów, zwanych podstawowymi parametrami technicznymi. Do parametrów tych należą m.in.: moc znamionowa silników trakcyjnych P_N , napięcie znamionowe silników trakcyjnych U_N , względny moment rozruchowy m_r , przeciążalność krytyczna m_k , przeciążalność rozruchowa m_{PR} , częstotliwość znamionowa silnika f_N , częstotliwość maksymalna napięcia stojana f_K oraz stopień przełożenia kinematycznego mechanizmu redukcyjnego z [14], [15].

Znane w teorii trakcji klasyczne już metody wyznaczania podstawowych parametrów pojazdu [8], [9], [20] ograniczają się do analizy mocy zastępczej (traktowanej w tym przypadku jako zmienna decyzyjna). Uwzględniane przy tym różnego rodzaju kryteria jakości doboru tej mocy zawężają się do warunków energetyczno - mocowych takich np. jak: minimum strat energii, minimum zużycia energii, minimum mocy maksymalnej lub minimum nadmiaru mocy. [4], [21], [22]. Zastosowanie tego typu metod przez innych Autorów dla przypadku silników asynchronicznych dokonuje się przy usztywnieniu zakresów prędkości jazdy poszczególnych etapów ruchu [28] - co oznacza zakładanie stałych wartości pozostałych parametrów technicznych. Tego typu warunki stanowią jednak zbyt istotne ograniczenie właściwości użytkowych napędu - nie powinny być więc nakładane na wstępie obliczeń. W przypadku pojazdów trakcyjnych napędzanych silnikami asynchronicznymi, sama moc pojazdu (wyznaczana w oderwaniu od innych parametrów technicznych) nie starcza ani do określenia charakterystyk trakcyjnych, ani tym bardziej - wymiarów układu. Wynika stąd konieczność unowocześnienia stosowanego dotychczas podejścia.

W nowej metodzie może być też celowa zmiana dotychczas obowiązującego kryterium jakości oceny parametrów układu. Autor uważa, że w przypadku uzmiennienia wszystkich parametrów technicznych układu, układ należy oceniać nie pod względem mocy (gdyż jest ona jedynie parametrem fizycznym), lecz pod względem kosztów budowy (umożliwiających porównywanie cen układów wymiarowanych dla identycznych wymagań trakcyjnych).

W celu opisanie zależności łączących ten wskaźnik z parametrami technicznymi konieczne było opracowanie większej liczby zagadnień naukowych, wśród których wyróżniają się: model losowości przebiegu jazdy i model parametrów pracy napędu. Konieczność opracowania tych modeli ma związek z wykazaną wcześniej [12], [13] dość dużą wrażliwością wyznaczanych parametrów charakterystyk napędu na wymagania ruchowe. Model umożliwia uwzględnienie błędów metody obliczania tych parametrów. Przedstawienie założeń tych modeli jest głównym celem tego artykułu. Zostaną też zaprezentowane przykładowe wyniki analizy kosztów budowy układu dla przypadku założeń ruchowych charakteryzujących tramwaj.

2. WARUNKI RUCHU

Zgodnie z klasycznym podejściem do zagadnienia wyznaczania podstawowych parametrów technicznych układu napędowego [8], [9], [20] wymagane warunki ruchu można opisywać za pomocą większej liczby wymagań części-

wych. Wyodrębnia się zazwyczaj następujące przypadki (w nawiasach podano oznaczenia stosowane w tym artykule): wymagania resortowe (*WR*), wymagania komunikacyjne (*WK*) oraz skrajne (*WS*).

Wymagania resortowe (WR) odnoszą się przede wszystkim do szczególnie ważnych parametrów dynamiki jazdy. W ruchu komunikacji miejskiej, konieczne są: przyśpieszenie $a_0 = 1.3 \text{ m/s}^2$ i opóźnienie $u_0 = 1.4 \text{ m/s}^2$ wagonu próżnego w zakresie prędkości 0 - 30 km/h, a w ruchu liniowym - minimalne przyśpieszenie $a_V = 0.05 \text{ m/s}^2$ przy zadanej prędkości jazdy V (np. dla $V = 20 \text{ m/s}$) i określona prędkość ustalona (np. $V_U = 25 \text{ m/s}$) [28].

Wymagania komunikacyjne (WK) stanowią opis najważniejszych zadań transportowych. Zazwyczaj formułuje się je w postaci rozkładu jazdy, podając czasy przejazdu normalne lub skrócone. Dla poszczególnych odcinków dróg przybierają następującą postać: pojazd o określonej masie m_p i znanych oporach ruchu W powinien przejechać zadany międzyprzystankowy odcinek drogi S_F z założoną prędkością średnią T_F . Wymagania te wiążą się z tzw. zerowymi początkowymi i końcowymi warunkami ruchu, czyli przejazdem odcinka drogi rozpoczętym i zakończonym postojem [20]. Tego typu warunki będą oznaczane symbolem $WK(S_F, T_F)$, gdzie S_F - odcinek drogi w metrach oraz T_F - czas przejazdu w sekundach (tzn. bez specjalnego rozróżnienia normalnych i skróconych rozkładowych czasów jazdy).

Wymagania skrajne (WS) są maksymalnie trudnymi warunkami ruchu. Należą do nich (w nawiasach - użyte symbole): jazda przy ograniczonej prędkości maksymalnej (*WSV*), jazda na wzniesieniu miarodajnym lub krytycznym (*WSW*), jazda przy maksymalnym zapełnieniu pojazdu (*WSM*), jazda przy obniżonym napięciu w sieci zasilającej (*WSU*), jazda na gonienie rozkładu jazdy po dodatkowym zatrzymaniu na trasie (*WSG*), zjazd z trasy przy pracującej połowie urządzeń napędowych (*WSZ*) lub jazda przy zmniejszonej przyczepności kół napędzanych (*WSF*). W klasycznym podejściu do zagadnienia stanowią jak gdyby formę uwzględnienia zmiennych zakłóceń, które mogą wystąpić w okresie ruchu.

3. MODEL OBIEKTU

Model obiektu czyli pojazdu, opisywany jest równaniami ruchu, ograniczeniami oraz wskaźnikami jakości. Wielkością wejściową jest siła pociągowa, a zakłóceniami zmienne w funkcji drogi opory trakcji [6], [9], [20].

Opisując ruch pojazdu zakłada się, że pojazd można zastąpić ciałem sztywnym. Na ciało działają siły pociągowa i oporów ruchu [6], [9], [20]. Przyspieszenie środka masy w dowolnej chwili czasu określa wzór:

$$a_t = \frac{u(v,t)}{m_p k_w}$$

przy czym:

$$u(v,t) = F(v,t) - W(v,t) \quad (1.1)$$

gdzie:

- a_t - przyspieszenie,
- $F(v,t)$ - siła pociągowa,
- $W(v,t)$ - całkowite opory ruchu,
- $u(v,t)$ - siła przyspieszająca,
- m_p - masa pojazdu,
- k_w - współczynnik mas wirujących.

Trakcyjne opory ruchu dzieli się na zasadnicze (podstawowe na odcinku prostym i płaskim w przeciętnych warunkach atmosferycznych) oraz dodatkowe (zależne od profilu trasy i warunków atmosferycznych) [6], [9], [20]:

$$W_p = w_0 + w_1 v + w_2 v^2 \quad W_d = m_p i_h(s) + w_a(t) \quad (1.2)$$

gdzie:

- W_p - podstawowe opory ruchu, aproksymowane funkcją kwadratową prędkości jazdy,
- W_d - opory dodatkowe,
- i_h - nachylenie odcinka drogi,
- w_a - poprawka oporów ruchu konieczna do uzyskania wartości rzeczywistej (uwzględniająca czynniki dodatkowe np. wpływ sytuacji atmosferycznej).

Określone w powyższy sposób przyspieszenie można przedstawić jako funkcję wielu czynników, zależnych od czasu, prędkości i miejsca. Analizując tą zależność zakłada się, że okres ruchu dzieli się na skończoną liczbę etapów jazdy, w których czynniki działające na przyspieszenie ze strony miejsca lub czasu są stałe. Funkcję przyspieszenia opisuje wzór:

$$a_t = a(v, \mu_1 + \delta_1, \mu_2 + \delta_2, \dots, \mu_k + \delta_k) \quad \text{dla} \quad t_0 \leq t \leq t_0 + T_j \quad (1.3)$$

gdzie:

- a - symbol wprowadzonej zależności funkcyjnej przyspieszenia od pszczególnych czynników,
- μ_i - wartość średnia i - tego czynnika działającego na przyspieszenie ze strony prędkości,
- σ_i - odchylenie wartości średniej tego czynnika od wartości rzeczywistej,
- t_0 i T_j - chwila początkowa i okres trwania etapu jazdy.

Przy przyjętych założeniach, równania ruchu można zapisać, następująco:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} s \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times a_t; \quad \begin{bmatrix} s_0 + S_j \\ V_{j+1} \end{bmatrix} = \int_{t_0}^{t_0+T_j} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} s \\ v \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} S_j \\ V_j \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

gdzie:

- s_0, V_j, t_0 - początkowe wartości drogi, prędkości i czasu,
- S_j, V_{j+1}, T_j - przebyty odcinek drogi, prędkość końcowa i okres trwania etapu jazdy.

Stosowane obecnie w trakcji wskaźniki jakości są zwykle dane w postaci funkcjonału parametrów wejścia oraz sterowania [6], [7], [9], [20], co przy przyjętych założeniach określa wzór:

$$J_j = f_\beta(V_{j+1}, s_0 + S_j, t_0 + T_j) + \int_{t_0}^{t_0+T_j} f_\alpha(v, s, a_t, t) dt \quad (1.5)$$

gdzie:

- J_j - etapowy wskaźnik jakości,
- f_α i f_β - funkcje skalarne.

Pierwszy składnik wskaźnika jakości wyraża koszt osiągnięcia stanu końcowego, a drugi - koszt przejścia zmiennych stanu od warunków początkowych do końcowych.

W okresie trwania etapu jazdy, żaden z czynników wpływających na przyspieszenie nie może przekraczać przyjętych z góry ograniczeń, co w przypadku ogólnym można zapisać jako:

$$Mi_{\min} \leq \mu_{ij} + \delta_i \leq Mi_{\max} \quad (1.6)$$

Sterowanie optymalne polega na przeprowadzeniu obiektu ze stanu początkowego do stanu końcowego przy minimalnej wartości wskaźnika jakości [1], [3]. Dla zerowych początkowych i końcowych warunków ruchu (pojazd przejeżdża odcinek drogi S_F w czasie T_F , zaczynając i kończąc postojem) warunki jazdy optymalnej opisują równania:

$$S_F = \sum_{j=1}^m S_j, \quad T_F = \sum_{j=1}^m T_j, \quad J_F = \sum_{j=1}^m J_j, \quad cel = \min(J_F) \quad (1.7)$$

gdzie oznaczono:

- S_j, S_F - etapowy odcinek drogi, zadany międzyprzystankowy odcinek drogi,
- T_j, T_F - etapowy czas jazdy, zadany całkowity czas jazdy,
- J_j, J_F - etapowy wskaźnik jakości, całkowity wskaźnik jakości,
- M - liczba etapów jazdy na które podzielono międzyprzystankowy okres ruchu.

Równania te, uzupełnione zależnościami (1.4), (1.5) wiążącymi parametry etapu: S_j , T_j , J_j z początkowymi i końcowymi prędkościami jazdy V_j , V_{j+1} oraz definicją przyspieszenia (1.3) i ograniczeniami (1.6), tworzą kompletny układ równań przebiegu jazdy optymalnej (zwany równaniami obiektu). Znając aproksymację czynników przyspieszenia, otrzymany układ można zawsze rozwiązać wyznaczając z niego etapowe prędkości jazdy: $V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_{m-1}$. W przypadku opisu ruchu, nie da się jednak z góry przewidzieć wszystkich zakłóceń przyspieszenia w sposób całkowicie poprawny w stosunku do rzeczywistości.

W celu uzyskania wiarygodnego wyniku obliczeń konieczne jest zastosowanie zasad rachunku błędu. Zgodnie z tymi zasadami rozwiązanie dzieli się na dwie składowe: systematyczną i poprawkę obliczeniową:

$$V_j = V_S + b_j \quad (1.8)$$

gdzie:

- V_S - składowa systematyczna,
- b_j - poprawka obliczeniowa.

Równania składowej systematycznej otrzymuje się przy pominięciu odchylenia czynników przyśpieszenia - $\sigma_i \approx 0$ (we wszystkich etapach jazdy). Rozwiązanie uzyskane przy tym warunku jest całkowicie jednoznaczne (nazwano je rozwiązaniem systematycznym). Wyznaczenie poprawki obliczeniowej wymaga natomiast zastosowania specjalnego modelu probabilistycznego.

4. MODEL PROBABILISTYCZNY DO WYZNACZANIA BŁĘDU METODY OBLICZENIOWEJ

Jako błąd oceny dowolnego parametru charakteryzującego obiekt sterowania należy przyjąć maksymalne odchylenie wartości rzeczywistej tego parametru od jego wartości średniej [1], [6]. Przyczyną zaistnienia błędu przy wyznaczeniu parametrów sterowania jest pominięcie czynników subiektywnych działających na przyśpieszenie ruchu. Wzory (1.3), (1.8) przewidują, że uwzględnienie tych czynników w opisie przebiegu jazdy wymaga wprowadzenia odchylenia σ_i oraz poprawek b_j . Wartości tych odchylenia powinny być każdorazowo ustalane dla konkretnych warunków jazdy panujących na trasie. W praktyce, warunki te są tak złożone, że ich analiza systematyczna nie ma sensu. Z tego względu wygodnie jest założyć, że o wartości przyjmowanego do obliczeń odchylenia decyduje przypadek. Wybór przyjmowanej do obliczeń wartości odchylenia σ_i parametru ruchu od wartości średniej (systematycznej) jest więc zdarzeniem losowym. W efekcie, odchylenia b_j są również zdarzeniami losowymi. Przestrzeń elementarna jest zbiorem wszystkich zdarzeń elementarnych (polegających na wyborze odchylenia σ_i lub poprawki b_j). Rodzina zdarzeń losowych dla problemu błędu, oznaczona Φ_{ST} , jest zbiorem zdarzeń elementarnych związanych z optymalnym przejazdem odcinka drogi. Prawdopodobieństwo jest miarą częstości wystąpienia zdarzenia.

Przy powyższych założeniach, do badania prawidłowości losowych między zdarzeniami w utworzonej rodzinie, można zastosować formalizm zmiennej losowej (czyli funkcji zdarzenia elementarnego, której wartość zależy od przypadku) [24], otrzymując [16]:

$$[X] = [P(\sigma_1), P(\sigma_2), \dots, P(\sigma_k)], \quad [Y] = [P(b_1), P(b_2), \dots, P(b_m)], \quad [Y] = g_{ST}([X]) \quad (2.1)$$

gdzie:

X - zmienna losowa wejściowa,

- Y - zmienna losowa wyjściowa,
 g_{ST} - symbol funkcji odpowiedniego rozkładu prawdopodobieństwa odwzorowującej prawidłowości losowe między zdarzeniami w rodzinie Φ_{ST} .

Powyższe równania nazwano w tej pracy równaniami składowej przypadkowej. W większości zastosowań technicznych (gdy spełnione są warunki prawa wielkich liczb) przyjmuje się, że rozkłady zmiennych losowych wejściowych i wyjściowych są rozkładami normalnymi [24]. Zakłada się, że warunki te spełnione są również dla odchyłeń parametrów ruchu pojazdu, przy czym ze względu na przyjmowane ograniczenia (1.6) - rozkłady te muszą być obustronnie ucięte (tego typu rozkłady są stosowane w trakcji m.in. przy analizie problemów zasilania [17]). Analiza prawidłowości losowych między zdarzeniami losowymi sprowadza się do badania parametrów charakterystycznych tych rozkładów. Tego typu postępowanie jest ogólnie znane. Stosując wzory opisujące związki parametrów charakterystycznych rozkładów wielowymiarowych [24], błędy graniczne wielkości wyznaczanych z rozwiązania układu równań jazdy optymalnej można opisać następująco:

$$b_j^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{dy_j}{dx_i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^k \sum_{l=i}^{k-1} \frac{dy_j}{dx_i} \frac{dy_j}{dx_{(j-1)}} \sigma_{il}, \quad B_j = \sqrt{b_j^2} \quad (2.2)$$

gdzie:

- σ_i - wariancja i - tej zmiennej losowej wejściowej,
 σ_{il} - kowariancja i - tej oraz l - tej zmiennej losowej wejściowej,
 b_j - wariancja j - tej zmiennej losowej wyjściowej,
 b_j^2 - odchylenie standardowe j - tej zmiennej losowej wyjściowej,
 B_j - poszukiwany błąd graniczny j - tej prędkości jazdy,
 k - liczba zmiennych losowych wejściowych,
 i oraz l - indeksy zmiennych losowych wyjściowych,
 $\frac{dy_j}{dx_i}$ - wrażliwość j - tego parametru wyjściowego (prędkości) na i -ty parametr wejściowy (czynnik przyspieszenia) określona na podstawie składowej systematycznej układu równań przebiegu jazdy optymalnej.

Wyprowadzenie wzorów określających wrażliwości parametrów prędkości w chwilach zmian etapów jazdy na parametry obiektu przedstawiono w osobnym artykule [12].

5. ZAKRES PRACY UKŁADU NAPĘDOWEGO

Typowy zakres pracy trakcyjnego układu napędowego wyposażonego w silniki asynchroniczne przedstawia rys.1: a) - charakterystyki regulacyjne, b) - charakterystyki mechaniczne. Wielkości zmienne oznaczono: f_s - częstotliwość napięcia stojana, I_s - prąd stojana, M_e - moment napędowy (linia pogrubiona - praca przeciążeniowa z mocą maksymalną rozruchu, linia ciągła - z mocą znamionową ciągłą oraz linia przerywana - z momentem krytycznym), U_s - napięcie stojana, ω_s - prędkość synchroniczna, ω_m - prędkość kątowna wału silnika. Punkty pracy oznaczono: F - punkt pracy ciągłej falownika, K - punkt pracy przy częstotliwości maksymalnej, N - punkt pracy ciągłej układu, P - punkt pracy przeciążeniowej, R - punkt pracy rozruchowej, S - punkt mocy maksymalnej silnika, U - punkt pracy przy osiągnięciu maksymalnego napięcia stojana. Parametry pracy oznaczono: f_N - częstotliwość znamionowa, f_K - częstotliwość maksymalna, I_N - prąd znamionowy, I_R - prąd rozruchowy, M_R - moment rozruchowy, M_N - moment znamionowy, M_{PR} - moment przeciążeniowy, M_{MAX} - maksymalny moment krytyczny silnika, M_{TN} - moment krytyczny w znamionowych warunkach zasilania, U_N - znamionowe napięcie przewodowe silnika, ω_{SR} i ω_{mR} - prędkości kątowne przy pracy z momentem rozruchowym i mocą maksymalną rozruchu (synchroniczna i wału), ω_{SRU} i ω_{mRU} - maksymalne prędkości kątowne zakresu pracy z momentem rozruchowym (synchroniczna i wału), ω_{SU} i ω_{mU} - prędkości kątowne końca rozruchu z osłabianiem napięcia (synchroniczna i wału), ω_{SN} i ω_{mN} - prędkości kątowne w znamionowych warunkach pracy (synchroniczna i wału), ω_{SP} i ω_{mP} - maksymalne prędkości kątowne zakresu pracy przeciążeniowej (synchroniczna i wału), ω_{SK} i ω_{mK} - maksymalne prędkości kątowne (synchroniczna i wału), ponadto: c - rodzina częstotliwościowa charakterystyk silnika.

Sterowanie gwarantujące poprawną obciążalność pojazdu trakcyjnego napędzanego maszyną asynchroniczną opisuje się zazwyczaj w postaci tzw. prawa sterowania silnikiem [9]:

$$\frac{f_{s1}}{f_s} = \frac{U_{s1}}{U_s} \sqrt{\frac{M_e}{M_{e1}}} \quad (3.1)$$

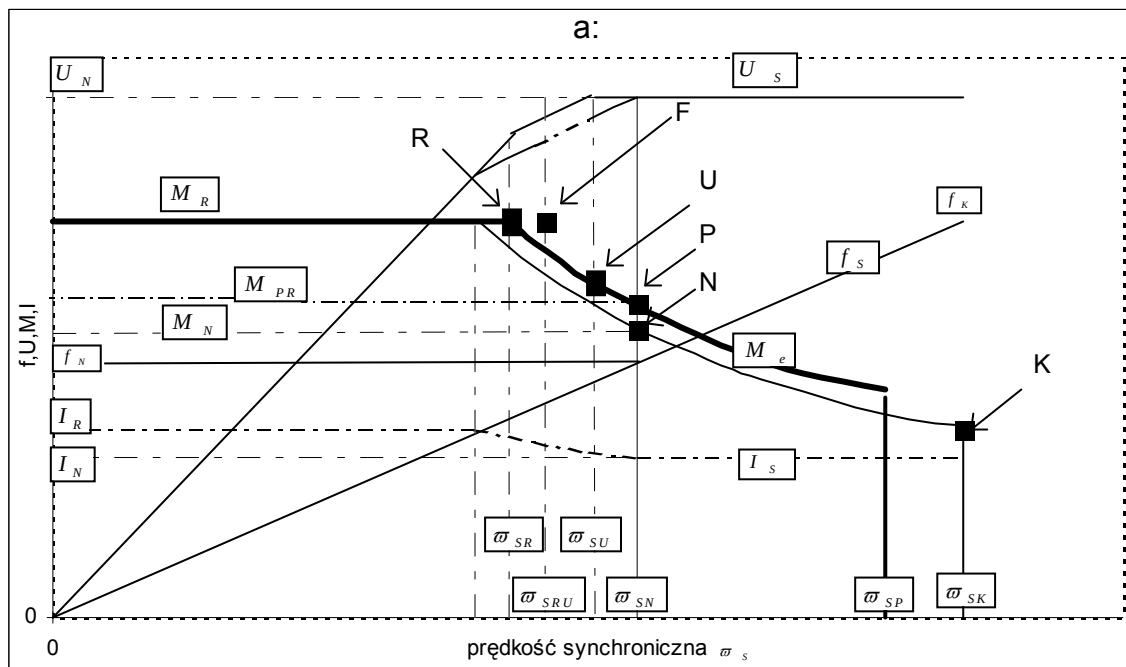
gdzie:

f_{s1} i f_s - częstotliwości napięcia stojana w dwóch różnych punktach pracy,

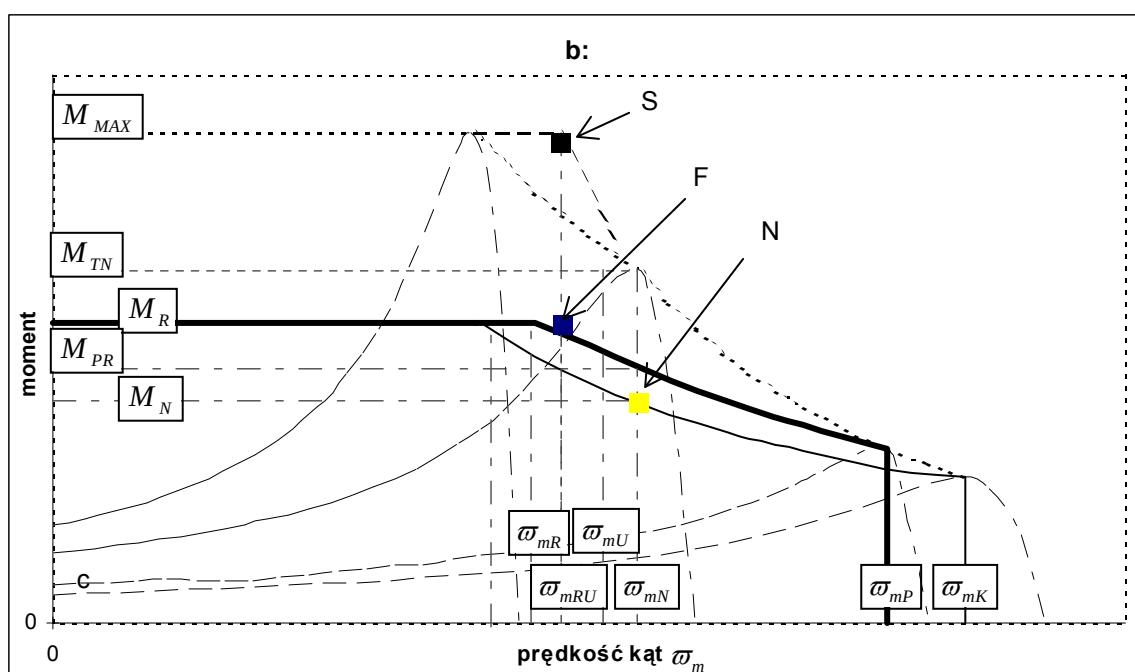
U_{s1} i U_s - napięcia stojana,

M_{e1} i M_e - momenty elektromagnetyczne.

a)



b)



Rys.1. Zakres pracy układu napędowego z osłabianiem napięcia:
 a) charakterystyka regulacyjna, b) charakterystyka mechaniczna.

Stosowane przebiegi sterowania zestawiono w tabeli 1. Kolumny oznaczono: I - zakres zmiany częstotliwości napięcia stojana, II - zakres zmiany napięcia stojana, III - uwarunkowanie między częstotliwością i napięciem, IV - zmiana poślizgu, V - charakterystyka momentu elektromagnetycznego. Stosowane w trakcji strefy sterowania oznaczono następująco: 1 - stały moment rozruchowy i stały prąd rozruchowy, 2a - stała moc i wzrost napięcia z pierwiastkiem prędkości, 2b - stała moc i liniowy wzrost napięcia, 2c - stała moc i stały prąd, 3 - moment krytyczny (lub spadek momentu z kwadratem prędkości) i liniowy spadek prądu. Parametry punktów pracy oznaczono stosując podobną zasadę jak na rys.1 (punkt R - koniec strefy 1: f_R - częstotliwość napięcia punktu pracy, U_R - napięcie końca strefy rozruchu ze stałym momentem, s_R - poślizg, M_R - moment rozruchowy; punkt U - koniec strefy 2a: f_U - częstotliwość napięcia punktu pracy, U_U - napięcie punktu pracy, s_U - poślizg, M_U - moment w punkcie pracy; punkt P - koniec strefy 2c: f_P - częstotliwość napięcia punktu pracy, U_P - napięcie punktu pracy, s_P - poślizg, M_P - moment punktu pracy; punkt K - koniec strefy 3: f_K - częstotliwość maksymalna, U_K - napięcie punktu pracy, s_K - poślizg, M_K - moment punktu pracy). Ponadto oznaczono parametry ekstremalne: f_0 - częstotliwość minimalna, U_0 - napięcie minimalne, f_K - częstotliwość maksymalna, U_{PR} - napięcie maksymalne okresu rozruchu.

TABELA 1

Zakresy i strefy sterowania.

	I	II	III	IV	V
1	$f_0 \leq f_s \leq f_R$	$U_0 \leq U_s \leq U_R$	$\frac{f_s}{U_s} = \frac{f_R}{U_R}$	$s f_s = s_R f_R$	$M_e = M_R$
2a	$f_R \leq f_s \leq f_U$	$U_R \leq U_s \leq U_U$	$\sqrt{\frac{f_R}{f_s}} = \frac{U_R}{U_s}$	$s f_s = s_R f_R$	$M_e = \frac{f_R}{f_s} M_R$
2b	$f_R \leq f_s \leq f_U$	$U_R \leq U_s \leq U_U$	$\frac{f_s}{U_s} = \frac{f_R}{U_R}$	$\frac{s}{s_R} = \left(\frac{f_R}{f_s}\right)^2$	$M_e = \frac{f_R}{f_s} M_R$
2c	$f_U \leq f_s \leq f_P$	$U_s = U_P$	$U_U = U_{PR}$ $U_P = U_U$	$s = s_U$	$M_e = \frac{f_U}{f_s} M_U$
3	$f_P \leq f_s \leq f_K$	$U_s = U_K$	$U_K = U_P$	$s f_s = s_P f_P$	$M_e = \left(\frac{f_P}{f_s}\right)^2 M_P$

Parametry punktów pracy poszczególnych stref sterowania wygodnie jest odnosić do znamionowego punktu pracy silnika, opisanego wartościami znamionowymi wszystkich parametrów: prędkość obrotowa wału, moment napędowy, napięcie oraz częstotliwość i poślizg stojana. Prowadzi to do zdefiniowania następujących współczynników charakteryzujących parametry pracy rozruchu oraz hamowania [2], [18], [25] (oznaczenia jak na rys.1):

$$\left. \begin{aligned} m_r &= \frac{M_R}{M_N}; & m_k &= \frac{M_{TN}}{M_N}; & m_{PR} &= \frac{M_{PR}}{M_N}; & k_R &= \frac{U_{PR}}{U_N} \\ m_h &= \frac{M_H}{M_N}; & m_{PH} &= \frac{M_{PH}}{M_N}; & k_H &= \frac{U_{PH}}{U_N} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

gdzie:

- M_R - moment rozruchowy,
- M_{TN} - moment krytyczny,
- M_{PR} - moment przeciążeniowy rozruchu,
- M_H - moment hamowania,
- M_{PH} - moment przeciążeniowy hamowania,
- M_N - moment znamionowy,
- m_r - względny moment rozruchowy,
- m_k - przeciążalność krytyczna,
- m_{PR} - przeciążalność rozruchowa,
- m_h - względny moment hamowania,
- m_{PH} - przeciążalność hamowania,
- U_{PR} - maksymalne napięcie pracy w okresie rozruchu,
- U_{PH} - maksymalne napięcie pracy w okresie hamowania,
- k_R - względne napięcie maksymalne rozruchu,
- k_H - względne napięcie maksymalne hamowania.

Przy wyznaczaniu siły pociągowej zakłada się ponadto, że moment elektromagnetyczny jest momentem na wale [19] oraz siła pociągowa powstaje na kołach napędzanych w wyniku tarcia statycznego z szyną jezdnią. Bardziej skomplikowane modele matematyczne opisujące sposób wywiązania siły w wyniku tarcia tocznego między powierzchniami kontaktowymi koła i szyny są niezbędne przy symulacji drgań w układzie napędowym [11]. Dla statycznych warunków tarcia przyjmuje się „sztywne” przełożenie kinematyczne podukładu koło napędzane - szyna [20]:

$$M_S = M_e, \quad F_p = l_S M_S \eta_Z \frac{z}{R}, \quad V_p = \varpi_m \frac{R}{z} \quad (3.3)$$

gdzie:

- F_p - siła pociągowa,
- M_S - moment napędowy na wale silnika,
- V_p - prędkość liniowa pojazdu,
- R - promień koła napędzanego,
- l_S - liczba silników,
- z - wypadkowe przełożenie kinematyczne układu wałów napędowych wózka silnikowego,
- η_Z - sprawność przekładni,
- ϖ_m - prędkość kątowa wału silnika.

Przedstawione założenia umożliwiają określenie obszaru dopuszczalnego zakresu pracy układu za pomocą odpowiedniej charakterystyki maksymalnej siły użytkowej. Przyjmując np., że sterowanie odbywa się w strefach 1, 2a, 2c tzn. w liniowej części charakterystyki magnesowania, otrzyma się:

$$F_{pm} = \begin{cases} F_{rR} & 0 \leq V_p < V_{rR} \\ F_{rU} & V_{rR} \leq V_p \leq V_{rU} \\ F_{rP} & dla \quad V_{rU} \leq V_p \leq V_{rP} \\ -F_{hC} & V_{hW} \leq V_p \leq V_{hH} \\ -F_{hH} & V_{hH} \leq V_p \leq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

gdzie:

- F_{pm} - maksymalna siła pociągowa,
- F_{rR} - maksymalna siła rozruchowa przy sterowaniu w strefie 1,
- F_{rU} - maksymalna siła rozruchowa przy sterowaniu w strefie 2a,
- F_{rP} - maksymalna siła rozruchowa przy sterowaniu w strefie 2c,
- F_{hC} - maksymalna siła hamowania przy sterowaniu w strefach 2c i 2a,
- F_{hH} - maksymalna siła hamowania przy sterowaniu w strefie 1,
- V_p - prędkość pojazdu,
- V_{rR} - maksymalna prędkość końca rozruchu w strefie 1,
- V_{rU} - maksymalna prędkość końca rozruchu w strefie 2a,
- V_{rP} - maksymalna prędkość końca rozruchu w strefie 2c,
- V_{hW} - maksymalna prędkość początku hamowania w strefie 3,
- V_{hH} - maksymalna prędkość początku hamowania w strefie 1.

Zależności wiążące powyższe parametry dopuszczalnego zakresu pracy rozruchu z podstawowymi parametrami technicznymi przedstawiono w tabeli 2. Parametry oznaczono identycznie jak poprzednio (wzór 3.2: m_r - względny moment rozruchowy, m_k - przeciążalność krytyczna, m_{PR} - przeciążalność rozruchowa, k_R - względne napięcie maksymalne rozruchu, wzór 3.3: R - promień koła napędzanego, l_s - liczba silników, z - wypadkowe przełożenie kinematyczne układu wałów napędowych wózka silnikowego, η_z - sprawność przekładni, wzór 3.4: V_p - prędkość pojazdu, V_{rR} - maksymalna prędkość końca rozruchu w strefie 1, V_{rU} - maksymalna prędkość końca rozruchu w strefie 2a, V_{rP} - maksymalna prędkość końca rozruchu w strefie 2c, F_{rR} - maksymalna siła rozruchowa przy sterowaniu w strefie 1, F_{rU} - maksymalna siła rozruchowa przy sterowaniu w strefie 2a, F_{rP} - maksymalna siła rozruchowa przy sterowaniu w strefie 2c, rys.1: f_N - częstotliwość znamionowa, s_R i s_N i s_U i s_P - poślizgi w punktach pracy wymienionych w opisie oznaczeń tabeli 1) oraz przyjęto nowe oznaczenia: P_N - moc znamionowa, p - liczba par biegunów.

TABELA 2

Parametry dopuszczalnego zakresu pracy rozruchowej

strefa	siła	prędkość
1	$F_{rR} = \frac{m_r}{(1-s_N)} \frac{pP_N}{2\pi f_N} l_s \eta_z \frac{z}{R}$	$V_{rR} = (1-s_R) \frac{k_R m_{PR}}{m_r} \frac{2\pi f_N}{p} \frac{R}{z}$
2a	$F_{rU} = \frac{(1-s)}{V_p} \frac{k_R m_{PR} P_N}{(1-s_N)} l_s \eta_z$	$V_{rU} = (1-s_U) \frac{k_R}{m_{PR}} \frac{2\pi f_N}{p} \frac{R}{z}$
2c	$F_{rP} = \frac{(1-s)}{V_p} \frac{k_R m_{PR} P_N}{(1-s_N)} l_s \eta_z$	$V_{rP} = (1-s_P) \frac{k_R m_k}{m_{PR}} \frac{2\pi f_N}{p} \frac{R}{z}$

Przedstawione zależności umożliwiają sformułowanie warunków dostosowania parametrów układu napędowego do wykonywania przewidywanych zadań trakcyjnych (zwanych w tej pracy warunkami obciążalności). W okresie ruchu nie ma możliwości przekroczenia żadnego z przedstawionych parametrów zakresu pracy maksymalnej (przedstawione relacje dotyczą rozruchu):

$$F_{rR} \geq F_R, \quad P_{rR} \geq P_R, \quad V_{rP} \geq V_P \quad (3.5)$$

gdzie:

 F_R - wymagana siła rozruchowa, P_R - wymagana maksymalna moc rozruchowa, V_{EP} - wymagana prędkość końca rozruchu.

Podobne zależności obowiązują też dla hamowania.

6. KOSZTY BUDOWY UKŁADU NAPĘDOWEGO

Koszt budowy wyposażenia elektrycznego układu napędowego zależy od kosztów budowy urządzeń głównych (silnika, przekształtnika). Przy określonym poziomie techniki i określonym sposobie chłodzenia, koszty budowy silnika zależą od objętości elementów czynnych [2], [18] a koszty budowy przekształtnika - od sposobu doboru jego elementów [10], [27]. W układzie napędowym sterowanym wg przedstawianego prawa sterowania, istnieją ścisłe zależności między tymi wymiarami [26]. Zgodnie z prawem wzrostu mocy silnika [2], [18], przy założonym wyzyskaniu elementów czynnych niezbędna objętość silnika D^2L wynika z wymaganego momentu maksymalnego M_{MAX} [24]. Elementy przekształtnika dobiera się natomiast dla prądu maksymalnego I_{MAX} , który może wystąpić w okresie jazdy [10], [24], [27]. Prąd ten zależy od wymaganej maksymalnej mocy rozruchowej, którą układ powinien zapewnić w warunkach pracy przy obniżonym napięciu zasilającym w sieci jezdnej. Przedstawione warunki można opisać następująco:

$$\left. \begin{aligned} \text{koszt} &= e_S M_{MAX} + e_F I_{MAX}, \\ I_{MAX} &= \frac{1}{k_f} \frac{(1-s_R)}{(1-s_N)} \frac{l_P \sqrt{m_r} P_N}{\sqrt{3} U_N \eta_R \cos \varphi_R}, \quad M_{MAX} = m_k m_r \frac{p P_N}{2\pi(1-s_N) f_N} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

gdzie:

- koszt - cena układu napędowego,
- M_N - moment znamionowy,
- m_k - przeciążalność momentem krytycznym,
- m_r - względny moment rozruchowy,
- k_f - minimalne względne napięcie pracy falownika,
- $\eta_R \cos \varphi_R$ - współczynnik obliczeniowy mocy pozornej rozruchowej,
- l_P - liczba silników zasilanych z przekształtnika,
- e_S - unormowany współczynnik wagowy kosztów budowy silnika o określonej objętości,
- e_F - unormowany współczynnik wagowy kosztów zestawienia przekształtnika dla określonego prądu (przy czym na podstawie kosztów budowy układu napędowego tramwaju 105N z lat 1998 - 2000, szacunkowe wartości tych współczynników wynoszą:
 $e_f \approx 10^3$ pln/A, $e_s \approx 10^4$ pln/kNm przy kursie 1 USD $\approx$ 3.5 - 4.0 pln).

Przedstawiona powyżej funkcja celu jest zależnością bardziej złożoną od funkcji celu stosowanych w klasycznych metodach wyznaczania mocy, w których podstawową zmienną decyzyjną jest moc. Przy podstawieniach $e_S = 0$ lub $e_F = 0$ umożliwia ona oddzielne wyznaczanie kosztów budowy poszczególnych urządzeń. Może być również zależna jedynie od mocy, jeśli zmienne decyzyjne: m_r , m_k , m_{PR} oraz f_N (a także U_N przy warunku uwzględniania wpływu spadku napięcia w sieci jezdnej na koszt budowy układu) będą traktowane jako parametry stałe.

7. ZASADY DOBORU PARAMETRÓW UKŁADU DLA OKREŚLONYCH ZADAŃ TRAKCYJNYCH

W celu doboru podstawowych parametrów technicznych układu powinny być rozwiązane równania obiektu przedstawione w pkt. 2 artykułu. Rozwiązanie jest poprawne jeśli po przyjęciu wyznaczonych podstawowych parametrów technicznych otrzymuje się zakres pracy wystarczający do wykonania zadań trakcyjnych, przy czym koszt budowy układu jest minimalny oraz spełnione są dodatkowe ograniczenia konstrukcyjne (m.in. ograniczenia, których opis pominięto w artykule np. dla średnicy silnika, minimalnej i maksymalnej indukcji w szczelinie lub prądu maksymalnego przekształtnika itd.).

8. PRZYKŁAD ANALIZY FUNKCJI KOSZTÓW

Do zilustrowania podanych rozważań, które prowadzą do wyznaczenia założeń projektowych układu napędowego podano wyniki przykładowych obliczeń przyjmując wybrane warunki ruchu charakteryzujące tramwaj (komunikacyjne WK, resortowe WR i skrajne ze względu na spadek napięcia w sieci jezdnej WSU):

Przyjęto następujące **dane wejściowe**:

- a) *parametry pojazdu i wymagań resortowych*: masa pojazdu próżnego - $m_0 = 20$ T, masa pojazdu pełnego - $m_p = 25$ T, współczynnik mas wirujących - $k_w = 1.2$ T/T, współczynnik przyczepności - $\mu = 0.3$ kN/kN, wymagane przyśpieszenie rozruchu pojazdu próżnego w zakresie prędkości do 30 km/h - $a_0 = 1.3$ m/s², wymagane opóźnienie hamowania pojazdu próżnego

go w zakresie prędkości od 30 km/h - $u_0 = 1.4 \text{ m/s}^2$, aproksymacja podstawowych oporów ruchu - $W = W_0 + W_1 v$, gdzie: $W_0 = 3 \text{ kN}$, $W_1 = 160 \text{ kNs/m}$, napięcie znamionowe w sieci jezdnej - $U_{IN} = 600 \text{ V}$, napięcie znamionowe silnika $U_N = 380 \text{ V}$, dopuszczalny spadek napięcia zasilającego w sieci jezdnej $\Delta U_l = \pm 150 \text{ V}$ (lub równoważne współczynniki opisujące warunki jazdy z obniżonym napięciem: $k_l = 1/0.75 = 1.33$, $k_f = 1.23$, $k_R = 0.92$)

- b) *parametry zmiennych warunków ruchu*. Składowa systematyczna - wartości średnie: długości odcinków dróg S_F z przedziału od 0 do 800 m, - czasy jazdy T_F do 60 s. Składowa przypadkowa - odchylenia wartości średnich modelu obliczeniowego: odchylenie masy pojazdu pełnego - $\sigma_M = 2.5 \text{ T}$, odchylenie drogi - $\sigma_S = 0.05 \times S_F \text{ m}$, odchylenie czasu - $\sigma_T = 0.05 \times T_F \text{ s}$, odchylenia dodatkowych oporów ruchu w poszczególnych etapach jazdy¹⁾ (rozruch ze stałą siłą - $\sigma_{W1} = 1.25 \text{ kN}$, rozruch ze stałą mocą - $\sigma_{W2} = 1.25 \text{ kN}$, wybieg - $\sigma_{W3} = 1.25 \text{ kN}$, hamowanie ze stałą mocą - $\sigma_{W4} = 1.25 \text{ kN}$, hamowanie ze stałą siłą - $\sigma_{W5} = 1.25 \text{ kN}$), tolerancja siły rozruchowej - $\sigma_{FR} = 1 \text{ kN}$, tolerancja siły hamowania - $\sigma_{FH} = 1 \text{ kN}$,
- c) *parametry stałe i ograniczenia konstrukcyjne* przyjęte m.in. na podstawie [2], [9], [25], [27], potrzebne do wyznaczenia kosztów budowy (podano najważniejsze): maksymalna średnica silnika $D_{MAX} = 0.46 \text{ m}$, współczynnik wyzyskania elementów czynnych silnika (stała Emdego) $c_{Emd} = 0.3 \text{ kV A min/obr/m}^3 = 9/\pi \text{ kNm/m}^3$, sprawność silnika $\eta_N = 0.96$, współczynnik obciążenia silnika: $\cos \varphi_N = 0.86$ sprawność przekładni - $\eta_Z = 0.96$, promień koła napędzanego przy średnim zużyciu powierzchni tocznej - $R = 0.375 \text{ m}$, liczba silników - $l_S = 4$, współczynnik kosztów budowy przekształtnika - $e_f = 10^3 \text{ pln/A}$, współczynnik kosztów budowy silnika - $e_s = 10^4 \text{ pln/kNm}$.
- d) *dodatkowe ograniczenia parametrów urządzeń* potrzebne dla potrzeb porównawczych. Zakładane parametry stałe: częstotliwość znamionowa $f_n = 50 \text{ Hz}$, przeciążalność mocą maksymalną $k_S = 1.15 \text{ kW/kW}$, przeciążalność momentem krytycznym $m_k = 1.7 \text{ kN/kN}$.

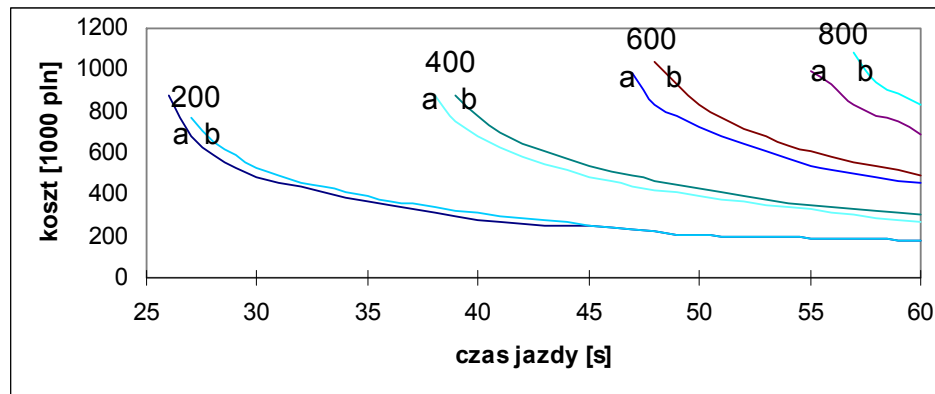
Wyniki obliczeń to założenia projektowe (spełniające wszystkie wymagania ruchowe i ograniczenia projektu), przy których funkcjonal (4.1) informujący o kosztach budowy układu napędowego osiąga minimum.

Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów zależności kosztów budowy układu od parametrów ruchu (czasu jazdy i długości odcinka drogi). Poszczególne wykresy podpisano symbolami określającymi długości zadanych

¹⁾ tolerancje etapowych oporów ruchu wyznaczono dla dopuszczalnych zmian nachylenia etapowych odcinków dróg $\pm 0.5 \%$.

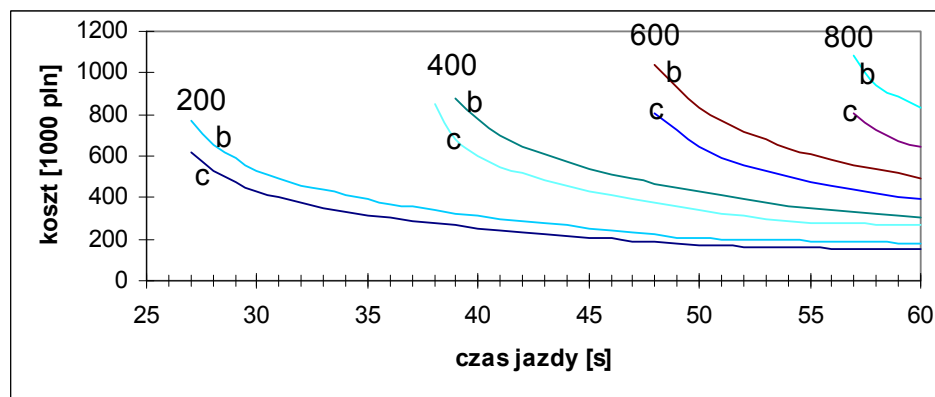
odcinków dróg dla warunków komunikacyjnych. Rysunki ilustrują wpływ dodatkowych założeń na wyniki obliczeń: rys.2 - błędy metody obliczeniowej (a - pominięto, b - uwzględniono), rys.3 - spadek napięcia w sieci jezdnej (b - przyjęto tzn. dla warunku WSU , c - pominięto), rys.4 - warunki porównawcze (b - pominięto, d - uwzględniono), rys.5 - warunki resortowe ($W1$ - linia kosztów $747 \cdot 10^3$ pln dla wymagań resortowych w warunkach pracy przy obniżonym napięciu w sieci jezdnej, $W2$ - linia kosztów $520 \cdot 10^3$ pln dla wymagań resortowych w warunkach pracy bez spadków napięć w sieci jezdnej, $A1$ - punkt kosztów układu spełniającego wymagania ruchowe przejazdu odcinka drogi $S_F = 800$ m w czasie $T_F = 59$ s przy zasilaniu obniżonym napięciem w sieci jezdnej, $A2$ - punkt kosztów układu spełniającego te same wymagania w warunkach pracy bez spadku napięcia w sieci jezdnej, $B1$ - punkt kosztów układu zdolnego do przebycia odcinka drogi $S_F = 400$ m w czasie $T_F = 40$ s przy obniżonym napięciu w sieci jezdnej, $B2$ - punkt kosztów układu zdolnego do przebycia tego samego odcinka drogi $S_F = 400$ m w tym samym czasie $T_F = 40$ s przy zasilaniu bez spadków napięcia w sieci jezdnej). Podstawowe parametry techniczne, charakteryzujące rozwiązania oznaczone na rysunku podano w tabeli 3 (ostatnie dwa wiersze - składniki kosztów). Widoczny jest wzrost nakładów niezbędny do spełnienia zakładanych warunków ruchu w przypadku skrajnego obniżenia napięcia zasilającego (wartości współczynników: k_l , k_f i k_R przyjęto w pkt. a). Widok trójwymiarowy ostatniej funkcji przedstawiono na rys.6.

Charakterystykę trakcyjną układu napędowego o przyjętych założeniach $A1$ przedstawia rys.7. Przykładowy przebieg prędkości pojazdu na odcinku drogi 800 m, przedstawiono na rys.8. Parametry zakresu pracy maksymalnej oznaczono identycznie jak w przypadku wzoru 3.4: V_{rR} - prędkość końca rozruchu ze stałą siłą, V_{rP} - prędkość końca rozruchu ze stałą mocą, V_{rK} - prędkość maksymalna, V_{hH} - prędkość początku hamowania ze stałą siłą, V_N - prędkość mocy ciągłej, F_{rR} - maksymalna siła rozruchu, F_{rP} - charakterystyka siły rozruchu maksymalnego przeciążenia, F_{rT} - charakterystyka siły rozruchu maksymalnej mocy krytycznej, F_{hH} - maksymalna siła hamowania, F_{hC} - charakterystyka siły hamowania maksymalnego przeciążenia, F_N - siła mocy ciągłej. Punkty charakteryzujące przejazd odcinka drogi oznaczono: O - początek ruchu, R - koniec rozruchu ze stałą siłą w chwili T_R , P - koniec rozruchu ze stałą mocą w chwili T_P , W - koniec wybiegu w chwili T_W , C - początek hamowania ze stałą siłą w chwili T_C , K - koniec ruchu w chwili T_F .



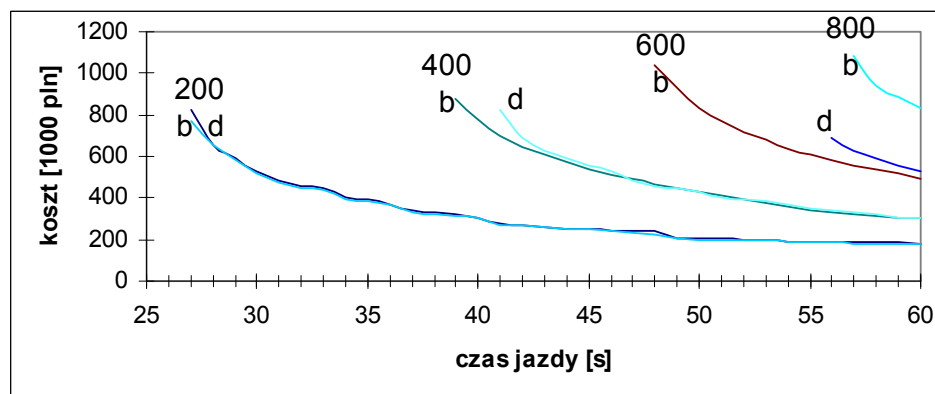
Rys.2. Koszty budowy układów napędowych tramwaju dla warunków komunikacyjnych.

Wpływ błędów obliczeniowych: a) pominięto, b) uwzględniono.



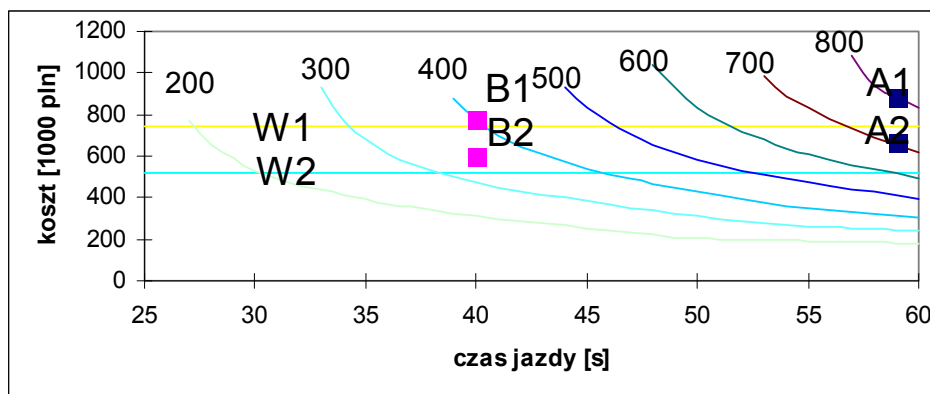
Rys.3. Koszty budowy układów napędowych tramwaju dla warunków komunikacyjnych.

Wpływ spadku napięcia: b) uwzględniono, c) pominięto.

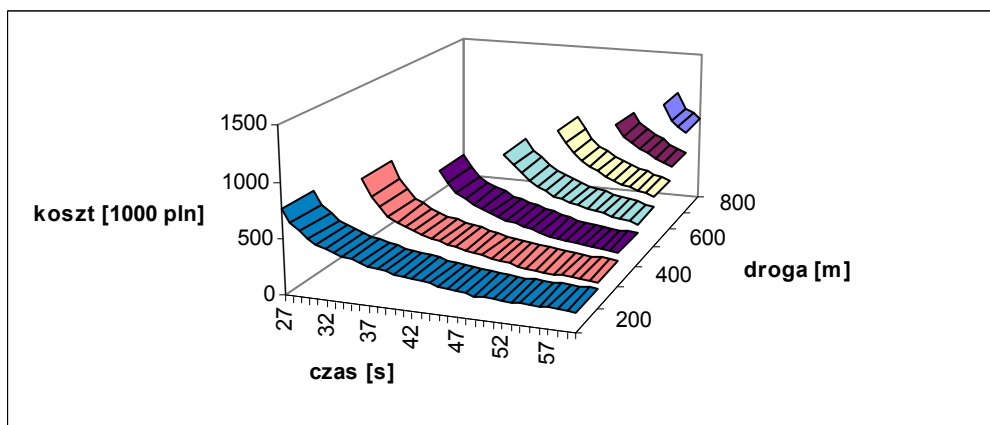


Rys.4. Koszty budowy układów napędowych tramwaju dla warunków komunikacyjnych.

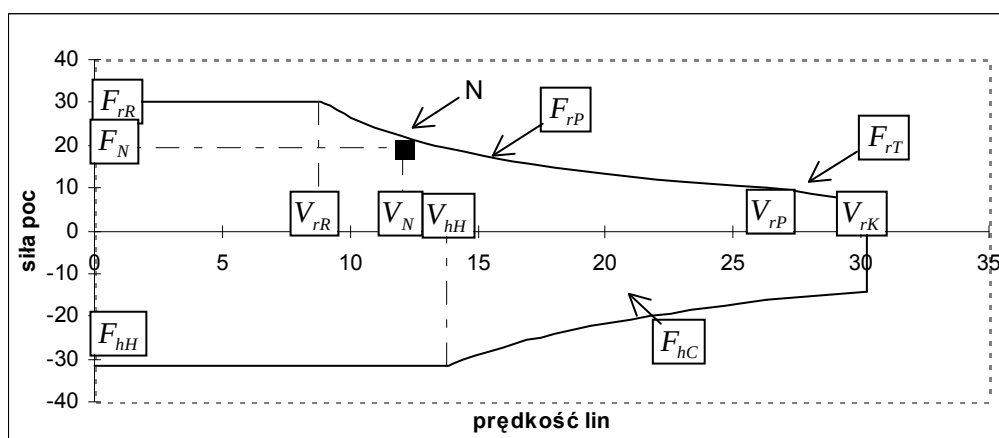
Dodatkowe warunki porównawcze: b) pominięto, d) uwzględniono.



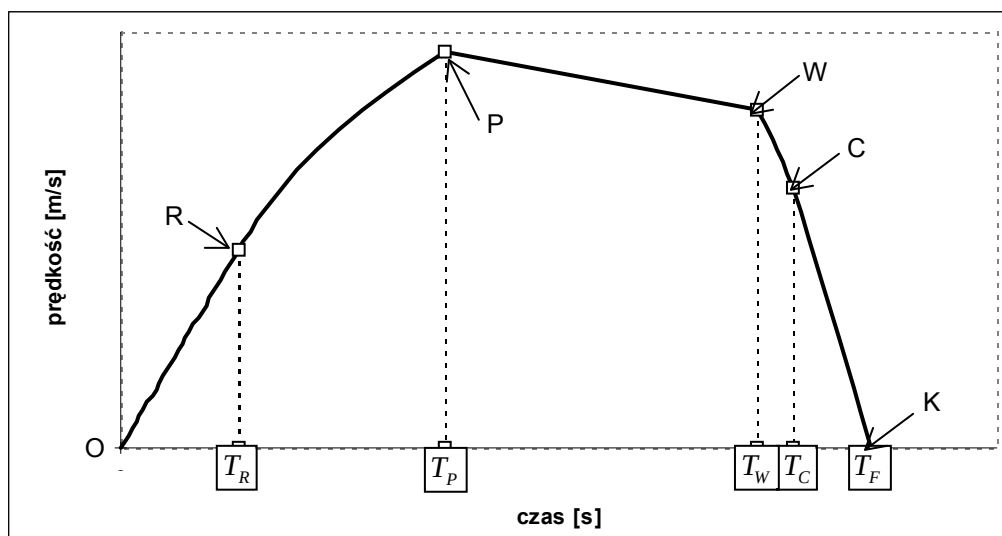
Rys.5. Porównanie kosztów budowy dla warunków komunikacyjnych i resortowych.



Rys.6. Koszty budowy układów napędowych tramwaju dla warunków komunikacyjnych. Widok 3D.



Rys.7. Charakterystyki trakcyjne układu napędowego tramwaju o parametrach A1.



Rys.8. Przebieg prędkości jazdy tramwaju o założonych parametrach i wyznaczonej charakterystyce dla średnich warunków ruchu na odcinku drogi 800 m w czasie 60 s.

TABELA 3

Parametry najtańszych układów napędowych dla wybranych warunków ruchu.

rozwiązanie	W1	W2	A1	A2	B1	B2
koszt - [10^3 pln]	747	520	884	671	777	600
napięcie znamionowe silnika - U_N [V]	380	380	380	380	380	380
moc znamionowa silnika - P_N [kW]	50	45	80	70	70	65
współczynnik przeciążalności - m_{PR} [A/A]	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
względny moment rozruchowy - m_r [Nm/Nm]	2.0	2.0	1.3	1.4	1.3	1.3
przeciążalność krytyczna - m_k [Nm/Nm]	2.1	2.1	2.2	2.3	2.0	2.1
częstotliwość znamionowa - f_N [Hz]	62	56	62	56	52	50
przełożenie kinematyczne przekładni - - z [Nm/Nm]	6	6	6	6	6	6
moment maksymalny - M_{Max} [kNm]	1.23	1.22	1.34	1.46	1.27	1.29
prąd maksymalny - I_{max} [A]	165	118	208	153	182	137

Dla przyjętych parametrów możliwa jest również analiza porównawcza z innymi rozwiązaniami. Wyniki obliczeń przedstawione na rys.5 pokazują, że wzrost nakładów o ponad 10 % skróci czasy przejazdów odcinków dróg z przedziału 700 - 800 m zaledwie o około 1- 2 s - nie jest więc celowy. Z kolei przyjęcie rozwiązania wyłącznie na podstawie warunków WR i WSU (oznaczonego na rys. symbolem W1) wyklucza przejazd odcinka o długości 800 m poniżej 60 s.

Należy zaznaczyć, że przedstawiony przykład obliczeniowy wykonano jedynie w celu ilustracji sposobu doboru podstawowych parametrów technicznych w oparciu o analizę minimalnych kosztów budowy układu napędowego.

Opisując warunki ruchu skrajne pominięto niektóre ważne składniki (m.in.: awaria w układzie napędowym WSZ). Uwzględnienie tego warunku nie zmieni jednak ani modelu obliczeniowego zaproponowanego do wyznaczania kosztów, ani przebiegu obliczeń polegającego na rozwiązaniu odpowiednich równań tego modelu. Zmieniają się jedynie współczynniki przyjmowane do obliczeń (przy pracującej połowie układu napędowego siły pociągowe zmniejszą się dwa razy), co wywoła wzrost nakładów inwestycyjnych układu napędowego (dla tych samych zadań trakcyjnych). Zastosowanie minimalizacji kosztów budowy układu na podstawie przedstawionej metody może mieć w tym przypadku większe znaczenie niż w ruchu bezawaryjnym.

9. ZAKOŃCZENIE

W przypadku zastosowania maszyny asynchronicznej do napędu głównego pojazdu trakcyjnego układ napędowy zawiera przekształtnik statyczny. Sama moc pojazdu nie starcza do prawidłowego zestawienia urządzeń napędowych. Do prawidłowego zestawienia układu napędowego konieczna jest znajomość większej liczby parametrów takich jak: napięcie znamionowe silnika U_N , moc znamionowa ciągła silnika P_N , względny prąd rozruchowy i_r , maksymalna przeciążalność momentem obrotowym przy prędkości znamionowej m_k , przeciążalność rozruchowa m_{PR} dla okresu jazdy z mocą maksymalną, wypadkowe przełożenie kinematyczne układu wałów napędowych wózka silnikowego z , częstotliwość znamionowa silnika f_N oraz częstotliwość maksymalna falownika f_K . Jeśli dodatkowo znane są wartości takich wielkości jak: sprawność, poślizg i współczynnik mocy w różnych punktach pracy, to parametry te umożliwiają pełny opis charakterystyki trakcyjnej pojazdu w sposób całkowicie jednoznaczny. Parametry te umożliwiają też wyznaczenie kosztów budowy układu napędowego oraz dają się powiązać z warunkami ruchu pojazdu trakcyjnego. Relacja ta opisana układem równań obiektu stanowi podstawę formalną do określenia zależności między minimalnym kosztem budowy układu, a zadawanymi warunkami ruchu.

Wykazano, że koszty budowy układu zależą nie tylko od średnich warunków jazdy na trasie ale również od wielu dodatkowych czynników. Do najważniejszych zaliczają się: napięcie w sieci jezdnej, dodatkowe ograniczenia unifikacji oraz wpływ czynników losowych na przebieg jazdy. Optymalny wybór parametrów układu napędowego do określonych warunków eksploatacji jest możliwy, ale wymaga analizy przebiegu zmienności funkcji powiązań warunków ru-

chu i kosztów budowy. Układ napędowego o parametrach technicznych otrzymywanych na podstawie tej analizy można traktować jako swego rodzaju element stały rozwiązania technicznego dla konkretnych wymagań eksploatacyjnych. Z tego względu rozwiązanie problemu optymalizacji kosztów budowy układu może stanowić ważną informacją dla przedsiębiorstw komunikacyjnych zamierzających zakup nowego lub modernizację istniejącego taboru, ułatwiając im podjęcie decyzji handlowych.

LITERATURA

1. Athans M., Falb P.L.: Sterowanie optymalne. Wstęp do teorii i jej zastosowania, PWN 1978.
2. Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT 1994.
3. Findeisen W., Szymanowski W., Wierzbicki A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN 1980.
4. Frąckowiak J.: Optymalizacja zużycia energii elektrycznej pojazdu trakcyjnego napędzanego przez trójfazowe silniki indukcyjne, Mat. Konf. Semtrak'96, Zakopane.
5. Giziński Z.: Trakcyjne układy napędowe. Możliwości i zadania Polskiej Nauki i Przemysłu Krajowego, Mat. Konf. Semtrak 2000 Zakopane, str. 41-44.
6. Goryca Z., Kacprzak J., Pniewska B.: Symulacja elementów układów napędowych i układów sterowania pojazdów, WPR, Radom 1997.
7. Ichikawa K.: Optimization of train operation, JSME 1968.
8. Jaworski Cz.: Teoria trakcji elektrycznej, WKiŁ, Warszawa 1956.
9. Kacprzak J., Koczara W.: Podstawy napędu elektrycznego pojazdów trakcyjnych, WKiŁ Warszawa 1990.
10. Kazmierkowski M., Tunia H.: Automatic Control of Converter-Fed Drives, Amsterdam-London-New York-Tokyo, 1994 ELSEVIER.
11. Kozłowski M.: Analiza drgań skrętnych w mechanicznym układzie napędowym pojazdu szynowego małej mocy, Prace Naukowe PW seria Transport z. 38, str. 87 - 115, Warszawa 1998.
12. Kozłowski M.: A method for determining traction characteristics of a tram, Archives of Electrical Engineering, Vol. XLIX No 3-4 2000, pp. 303-321.
13. Kozłowski M.: Sposoby zmniejszania mocy maksymalnej obciążenia tramwaju napędzanego silnikiem asynchronicznym, Prace Naukowe PW seria Transport, Z. 44/2000 str. 143-170.
14. Kozłowski M., Determination of Basic Technical Parameters of a Traction Vehicle Driving System Taking into Account Construction Cost of Master Devices, CP. MET Gdańsk 2001,
15. Kozłowski M., Cost Analysis for Setting up a Driving System of a Traction Vehicle, CP. ELECTRO Zylina 2001.
16. Kozłowski M., Entropy Formalism Applied to Evaluate Chance Variation in a Traction Vehicle Control, CP The Transport of the 21st Century, Warszawa 2001, pp.

17. Mierzejewski L., Szelaż A., Gałuszewski M.: Systemy zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego, WPW Warszawa 1989.
18. Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT 1986.
19. Plamitzer A.: Maszyny elektryczne, WNT 1970.
20. Podoski J., Kacprzak J., Mysiek J.: Zasady trakcji elektrycznej, WKiŁ Warszawa 1980.
21. Pospisil M., Kucera S., Chrabąszcz I.: Optymalizacja doboru elektrowozu dla lokalnych tras przejazdowych, przy zasilaniu prądem przemiennym 25 kV, 50 Hz, Mat. Konf. MET, Warszawa 1997, str 235 - 237.
22. Rawicki S.: Wpływ sprawności układu napędowego i współczynnika rekuperacji na energooszczędne sterowanie pojazdem trakcyjnym, Mat. Konf. Semtrak' 96, Zakopane.
23. Skarpetowski G.: Kryteria wyboru przekształtnikowych napędów pojazdów trakcyjnych, Mat. Konf. SEMTRAK Zakopane 2000, str. 139-147.
24. Sobczyk K.: Zarys teorii prawdopodobieństwa, WPW Poznań 1985.
25. Śliwiński T., Głowacki A., Parametry rozruchowe silników indukcyjnych, PWN 1982.
26. Teich W.: Grundsätzliche Abhängigkeiten der Fahrmotor- und Wechselrichter- Dimensionierung beim Asynchronmotorantrieb, ETR(24) 1/2-1975, str 44 - 50.
27. Tunia H. i inni: Układy energoelektroniczne - obliczanie modelowanie i projektowanie, WNT Warszawa 1982.
28. Wnuk M.: Wyznaczanie optymalnych parametrów pojazdu trakcyjnego z silnikami asynchronicznymi, Mat. Konf. MET'2001 Gdańsk str. 22-1.

Rękopis dostarczono, dnia 28.08.2001 r.

Opiniował: dr hab. inż. Zygmunt Giziński, prof. IEL

CHOSEN QUESTIONS CONCERNING COST MODELING AT SETTING UP DRIVING SYSTEMS FOR TRACTION VEHICLES

M. KOZŁOWSKI

SUMMARY

The paper presents a method for determining costs of setting up driving systems for traction vehicles equipped with traditional asynchronous motors. Construction costs of motors as well as of inverters have been considered. It has been assumed that at some established technology level and a determined cooling method a motor construction cost depends on the volume of active elements and an inverter construction cost – on the way its elements are selected. A dependence of the construction costs on basic technical pa-

rameters of a driving system has been determined. A function of relations between a minimum cost of setting up a driving system and traffic conditions has been presented. Calculation method errors have been taken into account. Adequate mathematical models that describe an optimal run course of a vehicle as well as operation ranges of a driving system have been presented. Results of example calculations that illustrate the application of the models at traffic conditions characteristic of a tram have been also presented.



Dr inż. Maciej Kozłowski urodził się w 1960 r. Stopień magistra uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1983 r. Kierunek elektrotechnika specjalność trakcja elektryczna. Zaś stopień doktora na Wydziale Elektrycznym PW obronił w 1991 r. w Zakładzie Trakcji i Urządzeń Elektrycznych pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jana Kacprzaka. Od 1983 r. zatrudniony w Zakładzie Wyposażzeń Elektrycznych w Transporcie i Systemów Trakcji w Wydziale Transportu PW. W latach 1991...1993 odbyte stypendium naukowe w Katedrze Metod Analitycznych Techniki Transportu i Pojazdów Szynowych w Nadreńsko – Westfalskiej Wyższej Szkole Technicznej w Aachen. Wykonane prace dotyczące analizy zmęczeniowej powierzchni toczonych kół napędzanych elek-

trycznych pojazdów trakcyjnych przy zastosowaniu modeli elektromechanicznych układów transmisji momentu trakcyjnego wózków silnikowych oraz wymiarowania trakcyjnych urządzeń napędowych na podstawie zadań trakcyjnych. W okresie 1994...2001 ponad dwadzieścia publikacji dotyczących tych tematów.