

Wyznaczanie charakterystyk trakcyjnych autobusów szynowych z różnymi rodzajami silników

W artykule przedstawiono zasady wyznaczania charakterystyk trakcyjnych autobusów szynowych z różnymi rodzajami napędów bezpośrednich z silnikami spalinowymi oraz z asynchronicznymi silnikami elektrycznymi, zasilanymi poprzez falowniki z elektrycznej sieci trakcyjnej lub z zespołu prądotwórczego.

Podano zależności potrzebne do wyznaczania wszystkich koniecznych do rozwiązywania równania ruchu autobusu sił, a następnie przedstawiono charakterystyki silników trakcyjnych oraz spalinowych i dla tych napędów przykładowe charakterystyki trakcyjne. Zwrócono uwagę na konieczność uwzględniania zmiennej sprawności przekładni napędowej. Przedstawiono także podstawowe zależności potrzebne do obliczania przejazdów teoretycznych i sposób wyznaczania zużycia energii lub paliwa.

Artykuł opracowany został na podstawie wyników prac prowadzonych w ramach projektu badawczego nr 9T12CO4919 Komitetu Badań Naukowych pt. Opracowanie i wybór na podstawie badań symulacyjnych układu napędowego i biegowego autobusu szynowego dla ruchu lokalnego.

1. Projektowanie charakterystyk napędu trakcyjnego

W artykule przedstawiono zasady wyznaczania charakterystyk trakcyjnych, a na ich podstawie osiągniętych trakcyjnych autobusów z trakcyjnymi silnikami asynchronicznymi w układzie napędowym o następującej konfiguracji:

1. zasilanie z sieci trakcyjnej 3 kV poprzez falownik,
2. zasilanie z zespołu prądotwórczego silnik spalinowy - prądnica synchroniczna.

Dla wyznaczania charakterystyk trakcyjnych nie ma szczególnego znaczenia z jakiego źródła zasilane są silniki. Źródło zasilania nabiera znaczenia dopiero wtedy, gdy istotne stają się wskaźniki energetyczne (zużycie energii lub paliwa). Kluczowym urządzeniem dla obu typów układów jest silnik asynchroniczny, dlatego zasady wyznaczania jego charakterystyk zewnętrznych (mechanicznych) zostaną przedstawione w pierwszej kolejności.

Podstawowym przeznaczeniem charakterystyk trakcyjnych pojazdu szynowego jest ich stosowanie do przeprowadzania obliczeń (a przy wykorzystaniu programów komputerowych symulacji przejazdów) pozwalających wyznaczyć podstawowe parametry pojazdu i osiągi przewozowe. Przedstawiony niżej algorytm jest przydatny dla pojazdu trakcyjnego komunikacji masowej przeznaczonego głównie do przewozów podmiejskich i lokalnych, a takim pojazdem jest m. in. autobus szynowy. Charakteryzuje się on stałym układem wagonów i powtarzalnym sposobem jazdy, a wymagana jest wysoka prędkość techniczna (stosunek długości odcinka międzyprzystankowego do czasu przejazdu) oraz racjonalne zużycie energii lub paliwa.

Pojazdy przeznaczone do obsługi masowego ruchu podmiejskiego charakteryzują się przyspieszeniem rozruchu (przy prędkości $v = 0$) na poziomie $0.6 \div 0.8 \text{ m/s}^2$ i hamowania $1.0 \div 1.2 \text{ m/s}^2$.

Prędkości techniczne wynoszą zazwyczaj:

- przy odległości międzyprzystankowej ok. 1000 m
30÷35 km/h,
- przy odległości międzyprzystankowej ok. 1600 m
40÷50 km/h.

W charakterystykach autobusów dąży się do rozszerzenia zakresu stałej siły rozruchu i hamowania elektrodynamicznego (jeśli jest stosowane) nawet do $0.6 \cdot v_{\max}$. Skutkiem tego jest ograniczenie zużycia energii i zwiększenie prędkości komunikacyjnej.

Kolejność postępowania przy projektowaniu charakterystyk trakcyjnych wynika z przyjęcia powyższych danych jako danych wyjściowych.

Kolejność działań jest następująca:

1. zestawienie wszystkich wymaganych parametrów konstrukcyjnych autobusu,
2. zebranie wszystkich wymaganych osiągniętych trakcyjnych i wskaźników eksploatacyjnych,
3. uzyskanie niezbędnych danych technicznych od producentów elementów napędu (charakterystyki silnika spalinowego, prądnicy, silnika elektrycznego, przekształtników trakcyjnych (prostownika, falownika), przekładni),
4. skompletowanie danych charakteryzujących trasę autobusu,
5. opracowanie charakterystyk trakcyjnych dla rozruchu i hamowania oraz oporów ruchu,
6. wykonanie obliczeń (metodami tradycyjnymi lub komputerowymi w przypadku przewidywania obliczeń wariantowych),
7. wyznaczenie mocy napędu trakcyjnego i urządzeń pomocniczych oraz przygotowanie danych

wyjściowych dla zespołu prądotwórczego w przypadku autobusu z zasilaniem autonomicznym, a w przypadku zasilania z sieci trakcyjnej - danych wyjściowych na urządzenia i aparaty o odpowiednich parametrach.

2. Określenie sił trakcyjnych oddziałujących na autobus

Wzorem podstawowym do wyznaczania wymaganych parametrów i zależności czasowych napędu jest wzór:

$$a = \frac{F_r}{m_p(1 + \alpha) + m_o}, \quad (1)$$

gdzie:

- a – wymagane przyspieszenie w [m/s²] (dana przyjęta przez konstruktora/użytkownika),
- F_r – efektywna siła rozruchowa na obwodzie kół w [N],
- m_p – masa całkowita autobusu w [kg] (parametr konstrukcyjny pojazdu),
- α – współczynnik mas wirujących układu napędowego autobusu (parametr konstrukcyjny napędu zależny od momentu bezwładności części wirujących napędu, takich jak wirnik silnika elektrycznego, zestaw kołowy, przekładnia); dla autobusów przyjęć można α=1.15÷1.20 [6],
- m_o – masa całkowita pasażerów w [kg].

Siła rozruchowa F_r jest wyznaczana z zależności:

$$F_r = F_n - F_o \quad (2)$$

gdzie:

- F_n – siła na kołach napędnych w [N],
- F_o – suma sił oporów ruchu w [N] (uwzględniająca opory podstawowe oraz zależne od profilu poprzecznego i poziomego trasy).

Podstawiając dalsze zależności otrzymuje się:

$$F_o = F_p + F_w + F_l \quad (3)$$

gdzie:

- F_p – podstawowe opory ruchu w [N],
- F_w – opory ruchu zależne od profilu pionowego trasy (wzniesień i spadków) w [N],
- F_l – opory ruchu zależne od profilu poziomego (w łukach) w [N].

Do obliczania podstawowych oporów ruchu elektrycznych autobusów szynowych można stosować odpowiednie wzory stosowane dla kilkuwagonowych zespołów trakcyjnych. Odpowiednie zależności wg [8] są jak podano poniżej.

$$F_p = (K + 0.53v)(m_p + m_o) + 147L_o + 1.27(2.7 + n)v^2 \quad (4)$$

Opory lokalne pochodzące od wzniesień i spadków można wyznaczyć następująco:

$$F_w = (m_p + m_o)g \cdot i \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

a inne, pochodzące od łuków wg zależności:

$$F_l = \frac{0.7(m_p + m_o)g}{R - 20} \quad (6)$$

gdzie:

- K – współczynnik zależny od rodzaju łożysk (toczne 6.4, ślizgowe 8.8),
- v – prędkość w [m/s],
- L_o – liczba osi autobusu,
- n – liczba członów w autobusie,
- g – przyspieszenie ziemskie w [m/s²],
- i – profil trasy w [‰],
- R – promień łuku w [m].

Większość składników wyznaczających siłę rozruchową jest zmienna i zależna od prędkości autobusu, konieczne jest zatem zaprojektowanie odpowiedniego jej przebiegu, zapewniającego uzyskanie wszystkich założonych parametrów.

Do tego celu niezbędna jest wiedza o sposobie regulacji prędkości obrotowej silnika trakcyjnego, co dla autobusów określonych w tytule opracowania oznacza silniki asynchroniczne.

3. Charakterystyki asynchronicznych silników trakcyjnych

W nowoczesnych autobusach szynowych stosowane są z zasady dwa typy napędów, jeden z trakcyjnymi silnikami elektrycznymi zasilanymi z sieci lub zespołu prądotwórczego, drugi to bezpośredni napęd silnikami spalinowymi poprzez przekładnię. W napędach pierwszego typu dominującą rolę pełni obecnie silnik asynchroniczny.

Najwygodniejsza jest regulacja obrotów tego silnika przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego, dostępna w nowoczesnych rozwiązaniach, w których stosuje się najnowsze osiągnięcia energoelektroniki.

Obroty silnika asynchronicznego określone są zależnością:

$$n = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p} \quad (7)$$

gdzie:

- n – prędkość obrotowa,
- s – poślizg wewnętrzny (stosunek częstotliwości dwóch pól elektromagnetycznych: wirnika i stojana),
- f – częstotliwość napięcia zasilającego,
- p – liczba par biegunów silnika.

Regulacja prędkości obrotowej silnika asynchronicznego w napędach trakcyjnych odbywa się w pierwszym zakresie regulacji rozruchu przez podnoszenie częstotliwości z równoczesną, proporcjonalną zmianą skutecznej wartości napięcia zasilającego.

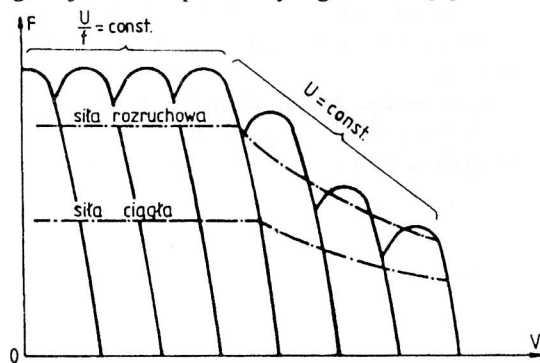
Moment obrotowy silnika asynchronicznego jest prawie wprost proporcjonalny do kwadratu napięcia zasilającego, a równocześnie prawie odwrotnie proporcjonalny do reaktancji wirnika, która maleje z obniżaniem częstotliwości, a ponieważ potrzebny jest duży moment rozruchowy pojazdu, regulację obrotów na początku rozruchu, jak podano wyżej, wykonuje się zachowując warunek $U/f = \text{const}$ (U - napięcie, f - częstotliwość zasilania silnika).

W drugim zakresie rozruchu, po uzyskaniu napięcia nominalnego, regulacja następuje tylko przez wzrost częstotliwości. Czasami stosowany jest także trzeci zakres regulacji ze zmianą tzw. poślizgu wewnętrznego silnika. Na charakterystyce silnika $M = f(n)$ odpowiada to prawemu zboczu charakterystyki dla maksymalnej częstotliwości.

Opisana wyżej regulacja możliwa jest tylko przy zastosowaniu najnowszej techniki sterowań impulsowych.

W pojazdach szynowych praktycznie nie stosuje się innych metod regulacji, powszechnie stosowanych w napędach stacjonarnych.

Przebieg charakterystyk silnika asynchronicznego dla różnych napięć oraz przy zachowaniu warunku $U/f = \text{const}$ przedstawiono na rys. 1, a na rys. 2 przedziały regulacji silnika i parametry regulowane [4].

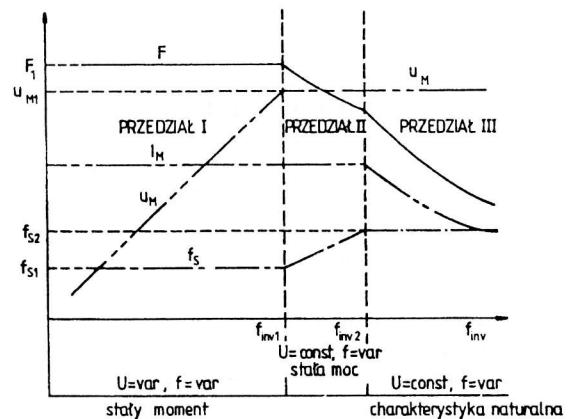


Rys. 1. Przykładowa charakterystyka regulacyjna trakcyjnego silnika asynchronicznego

W pracy prądnicowej częstotliwość falownika jest tak regulowana, że maszyna obraca się z prędkością nad-synchroniczną, tzn. pole jej wirnika jest przyhamowywane przez pole wirujące stojana. Przy obniżaniu prędkości pojazdu obniżana jest także częstotliwość. Zagadnienie to dotyczy tylko pojazdów, w których zastosowane zostało odzyskowe hamowanie elektrodynamiczne (w autobusie zasilanym z sieci trakcyjnej) lub oporowe (możliwe teoretycznie w każdym autobusie z silnikami elektrycznymi).

Hamowanie elektrodynamiczne może przebiegać jako odzyskowe lub oporowe. Stosowanie układów hamulca elektrodynamicznego w autobusach szynowych nie jest powszechnie stosowane, ponieważ ze specyfiki ruchu wynika małe prawdopodobieństwo możliwości

odebrania przekazywanej energii przez drugi pojazd poruszający się na tym samym odcinku zasilania z podstawy i do tego znajdujący się w fazie pobierania energii, a zabudowanie oporników hamowania, ze względu na ich dużą moc i brak wolnych przestrzeni w autobusie jest konstrukcyjnie kłopotliwe.



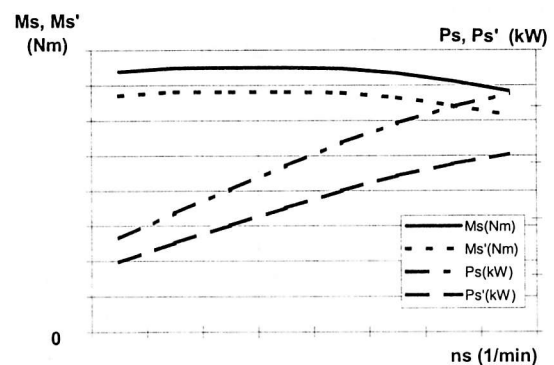
Rys. 2. Przedziały regulacji trakcyjnego silnika asynchronicznego

(F – siła rozruchowa napędu, U_m – napięcia na zaciskach silnika, I_m – prąd silnika, f_s – częstotliwość stojana)

4. Charakterystyki spalinowych silników napędowych

Charakterystyki napędu z silnikami spalinowymi różnią się zasadniczo od tych z silnikami elektrycznymi. Na rys. 3 przedstawione zostały charakterystyki zewnętrzne silnika spalinowego.

Na rysunku oznaczono: M_s – moment całkowity na wale silnika, M_s' – moment użyteczny na wale silnika po odliczeniu momentu na urządzenia pomocnicze silnika, jak pompy, alternator itp. oraz P_s i P_s' – odpowiednie moce.



Rys. 3. Przykładowe charakterystyki zewnętrzne silnika spalinowego

5. Charakterystyki trakcyjne autobusu

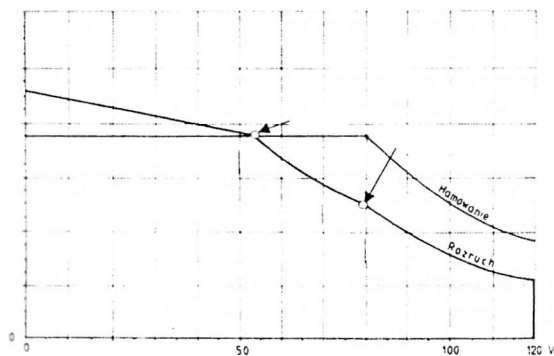
Jak zauważono wcześniej, jedną z najistotniejszych krzywych opisujących ruchowe cechy pojazdu jest zależność między siłą trakcyjną i prędkością pojazdu $F = f(v)$, zarówno dla rozruchu jak i hamowania.

Krzywe te nazywane są charakterystykami trakcyjnymi. Dodatkowo wysowywane są także krzywe oporów ruchu, aby można było z nich odczytać zdolność pojazdu do pokonywania wzniesień i do ruszenia z pełnym obciążeniem lub określić zapas siły przy prędkości maksymalnej.

Dla autobusu szynowego, oprócz charakterystyki trakcyjnej podaje się również inne dane: przyspieszenie rozruchu i hamowania oraz tzw. prędkość techniczną.

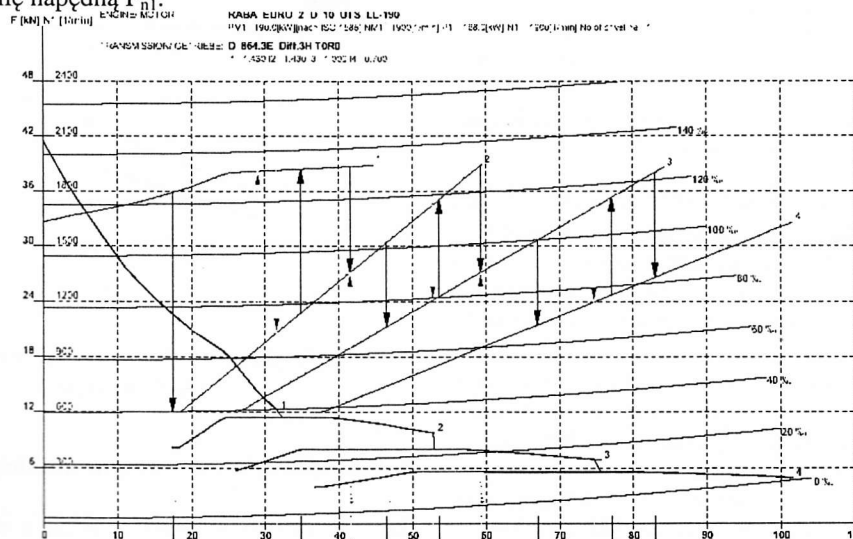
Do obliczenia trakcyjnej charakterystyki pojazdu konieczna jest znajomość charakterystyk silnika (moment obrotowy w funkcji prądu i prędkości obrotowej) oraz znajomość głównych parametrów pojazdu: masy, średnicy koła napędnego, stopnia przełożenia silnik - koło i sprawności przekładni.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładową charakterystykę trakcyjną (rozruchu i hamowania elektrodynamicznego) dla opisywanego rodzaju napędu z silnikami asynchronicznymi [4].



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki trakcyjne autobusu z przekładnią elektryczną

Charakterystyczne punkty tej charakterystyki ustala się następująco. Dla $v = 0$, na poziomie i prostej wylicza się wszystkie składowe oporów ruchu i dla przyjętego przyspieszenia oraz wypadkowej masy wyznacza się wymaganą siłę napędową F_{n1} .



Rys. 5. Przykładowe charakterystyki trakcyjne dla przekładni hydrodynamicznej

Z założonego zakresu stałej siły odczytać można prędkość v_1 , do której ta stała siła ma być realizowana. Te dwie wartości określają koniec zakresu wzrostu częstotliwości i napięcia na wyjściu falownika zasilającego silnik i początek zakresu wzrostu częstotliwości przy stałej już amplitudzie napięcia. Dla określonej liczby silników możliwe jest już odczytanie wymaganej mocy rozruchowej jednego silnika.

Odpowiednia zależność jest następująca:

$$P_{rs} = \frac{F_{n1} \cdot v_1}{L_s} \quad (8)$$

gdzie:

P_{rs} – moc rozruchowa jednego silnika [W],

F_{n1} – siła napędowa w I zakresie rozruchu (wartość stała) [kN],

v_1 – prędkość końca I zakresu rozruchu autobusu [km/h],

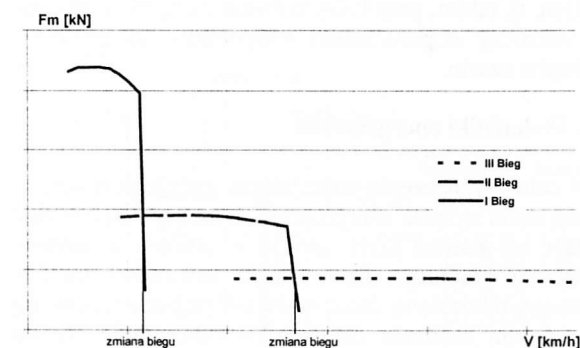
L_s – całkowita liczba silników trakcyjnych w autobusie.

Po uzyskaniu nominalnej wartości częstotliwości napięcia zasilającego następuje zwiększanie poślizgu (począwszy od punktów F_{n2} i v_2).

Odmienne wyglądają charakterystyki trakcyjne autobusów z bezpośrednim napędem silnikami spalinywymi. Oprócz innego przebiegu momentu na wale silnika, dodatkowy wpływ na różnice w przebiegu charakterystyk trakcyjnych autobusu, w stosunku do tych z silnikami elektrycznymi ma rodzaj przekładni. Na rysunkach 5 [10] i 6 [3] przedstawione zostały charakterystyki trakcyjne (siła na kole napędnym) dla dwóch typów przekładni, pierwszej cztero-, drugiej trzbiegowej.

Z wykresów widać, że na optymalny przebieg sił w całym zakresie prędkości, wpływ ma dobór prędkości, przy których następuje zmiana przełożenia (tzw. biegu).

Dobór mocy silnika i wynikający z niej wymagany moment na wale silnika przeprowadza się przy użyciu tych samych wzorów co dla silników elektrycznych. Jeśli porówna się oba typy charakterystyk, z przekładnią elektryczną i mechaniczną, to przekładnia elektryczna zapewnia korzystniejszy przebieg charakterystyki, tzn. ma większą wartość stosunku wartości siły minimalnej (przy $V=V_{\max}$) do maksymalnej (przy $V=0$).



Rys. 6. Przykładowe charakterystyki siły trakcyjnej F_m dla przekładni mechanicznej

Najkorzystniej, ze względu na zużycie energii, jest przeprowadzanie rozruchu i hamowania z maksymalnymi przyspieszeniami i opóźnieniami. Ograniczeniem jest tutaj przyczepność na styku szyna – koła autobusu.

Dopuszczalna siła rozruchowa lub hamowania ograniczona musi być do wartości:

$$F_{\max} = \mu \cdot m_j \cdot g \quad (9)$$

gdzie:

μ – współczynnik przyczepności między kołem i szyną,

m_j – masa spoczywająca na osi napędnej (lub hamowanej) pojazdu w [kg].

Współczynnik przyczepności z kolei może być wyznaczony z szeregu zależności [6], z których w Polsce stosowana jest poniższa:

$$\mu(v) = \frac{7.5 \cdot \mu_0}{0.331 \cdot (44 + 3.6v)} + 0.161 \quad (10)$$

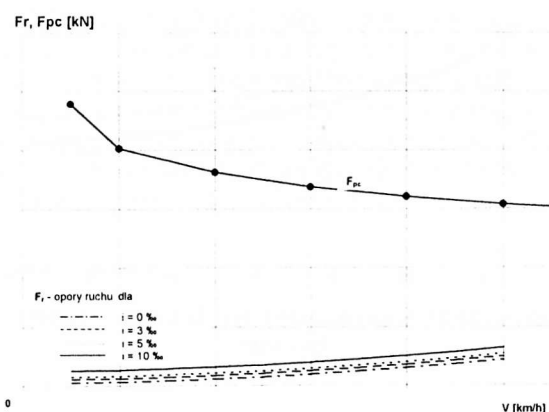
gdzie:

$\mu(v)$ – maksymalna wartość współczynnika przyczepności dla wybranego zakresu poślizgu,

μ_0 – współczynnik zależny od stanu szyn (mokre: 0.25, przeciętne: 0.3, suche: 0.33),

v – prędkość autobusu w [m/s].

Przykładowe charakterystyki oporów ruchu na wzniesieniach o różnym nachyleniu, oparte na zależnościach (4) i (5), oraz krzywa dopuszczalnych sił rozruchu ze względu na przyczepność autobusu F_{pc} przedstawione są na rys. 7.



Rys. 7. Przykładowe charakterystyki oporów ruchu i przyczepności

Do przeprowadzenia obliczeń trakcyjnych konieczna jest także znajomość charakterystyki hamowania. Autobusy mają z reguły niewiele osi napędnych i dlatego nawet w tych posiadających napęd z silnikami elektrycznymi i hamowanie elektrodynamiczne (o przykładowej charakterystyce pokazanej na rys. 4) samo hamowanie elektrodynamiczne jest niewystarczające do uzyskania wymaganych dróg hamowania.

Z tego powodu musi być zainstalowany hamulec mechaniczny zasilany sprężonym powietrzem. Przykładowa charakterystyka takiego hamulca przedstawiona jest na rys. 8. W przypadku stosowania sterowania z przełączaniem ciśnienia w cylindrach wykres będzie przebiegał wg krzywej 2.

Dla celów praktycznych, przy niektórych obliczeniach (patrz wzór 15) celowe jest skorzystanie z zależności na wyznaczanie momentu obrotowego z realizowanej na styku koło – szyna siły pociągowej F_r (lub hamowania F_h) silnika:

$$M_r = \frac{F_r \cdot D}{2 \cdot \eta_p \cdot z \cdot L_s} \quad (11)$$

$$M_h = \frac{F_h \cdot D \cdot \eta_p}{2 \cdot z \cdot L_s} \quad (12)$$

gdzie:

M_r – moment obrotowy silnika podczas pracy silnikowej,

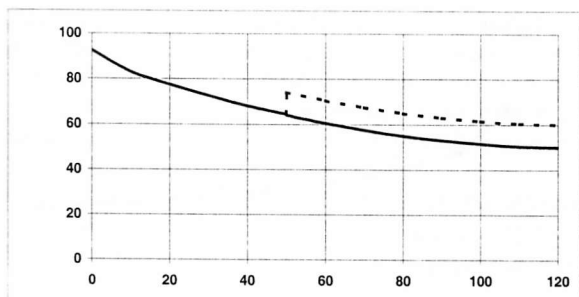
M_h – moment obrotowy silnika podczas pracy prądnicowej,

D – średnica koła napędnego,

η_p – sprawność przekładni, zależna od obciążenia momentem,

z – stopień przełożenia,

L_s – liczba silników w autobusie.



Rys. 8. Przykładowa charakterystyka hamowania pneumatycznego

Należy zauważyć, że przy określaniu efektywnego udziału siły hamowania elektrodynamicznego w procesie hamowania trzeba uwzględnić dwa fakty:

- opory ruchu w procesie hamowania dodają się do sił wytwarzanych na obwodzie kół, zatem wartości opóźnień o tych samych wartościach jak przyspieszenia rozruchu uzyskuje się przy mniejszych siłach na obwodzie kół,
- sprawności urządzeń w łańcuchach przekształcania energii, biorących udział w przetwarzaniu energii płynącej do sieci lub do opornika rozruchowego przy obliczeniach (patrz wzór 12) przesuwają się z mianownika do licznika wzoru, powodując zmniejszenie obciążenia np. silnika trakcyjnego i przekształtników.

6. Określanie wymaganej mocy silników

Określanie wymaganej mocy silników odbywa się przy projektowaniu nowego pojazdu lub wykorzystaniu eksploataowanego już pojazdu do innych zadań przewozowych. Nowoczesna technika komputerowa umożliwia bardzo dokładne, szybkie i wielowariantowe określenie wymaganej mocy silników trakcyjnych metodą symulacji przejazdów, z uwzględnieniem istotnych elementów mających wpływ na jazdę.

Program symulacji przejazdów oparty jest na modelu napędu (od źródła zasilania do silnika i układu sterowania), modelu pojazdu i modelu trasy. W wyniku symulacji otrzymuje się przebieg parametrów elektrycznych silnika w trakcie całego przejazdu, wyznaczony z łańcucha zależności: $P \rightarrow U \rightarrow I$. Napięcie zasilania silników na znacznej części odcinka jazdy jest różne od znamionowego, co należy uwzględnić przy wyznaczaniu mocy zastępczej silników. Dodatkowo w przypadku autobusu, w którym silniki elektryczne zasilane są z zespołu prądoworczo-silnik spalinowy – prądnica, należy dla każdej chwilowej mocy silnika spalinowego i osiąganych przy tej mocy obrotów dodatkowo wyznaczać chwilowe zużycia paliwa.

Określenie mocy zastępczej nie wyczerpuje problemu wyznaczenia mocy silników, ponieważ poza tym należy:

- uwzględnić niedokładność metody i zapewnić z tego powodu ok. 10% rezerwy,
- sprawdzić przeciążalność chwilową silnika i odnieść ją do wymagań rozruchowych pojazdu.

W doborze napędu dla pojazdów komunikacji masowej, a takim jest autobus szynowy, równie ważnym oprócz mocy zastępczej jest kryterium dopuszczalnego przeciążenia mocą rozruchową,

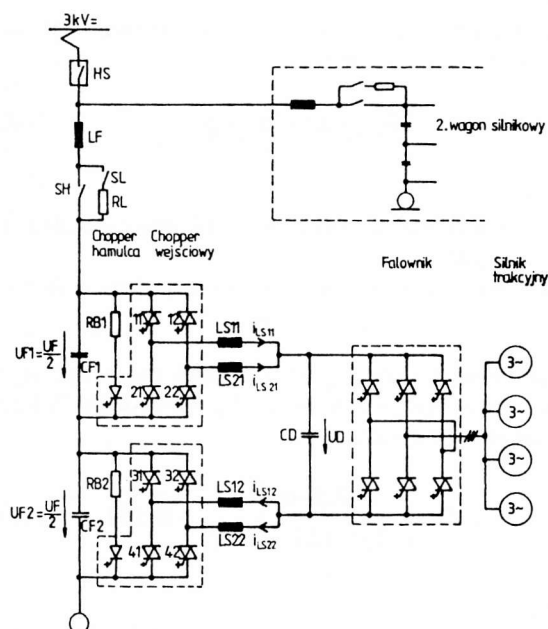
- zapewnić wymagane przyspieszenie i szerokość przedziału prędkości, w którym ma być utrzymywane stałe przyspieszenie.

Moc silników trakcyjnych dla autobusów szynowych określana powinna być jako moc ciągła. Jest to moc odpowiadająca nagrzewaniu maszyny prądem ciągłym, tj. takim, przy którym żadna z części silnika nie przekroczy dopuszczalnej temperatury w dowolnie długim czasie.

7. Wskaźniki energetyczne

W celu wyznaczenia wskaźników energetycznych, w znaczeniu zużycia energii przez autobusy zasilanych z sieci lub paliwa przez autobusy zasilane z autonomicznej prądnicy, dla ustalenia zależności między energią odniesioną do obwodu kół pojazdu a pobraną ze źródła zasilania celowe jest odniesienie się do przykładowych schematów zasilania energią.

Podstawowo można mieć do czynienia z dwoma typami zasilania, przy czym przepływ energii od źródła zewnętrznego do kół jest inny dla sieci prądu stałego (rys. 9) [4], inny dla sieci prądu przemiennego (rys. 10) [5], oraz, co jest oczywiste, dla zasilania ze źródła wewnętrznego (rys. 11) [7].

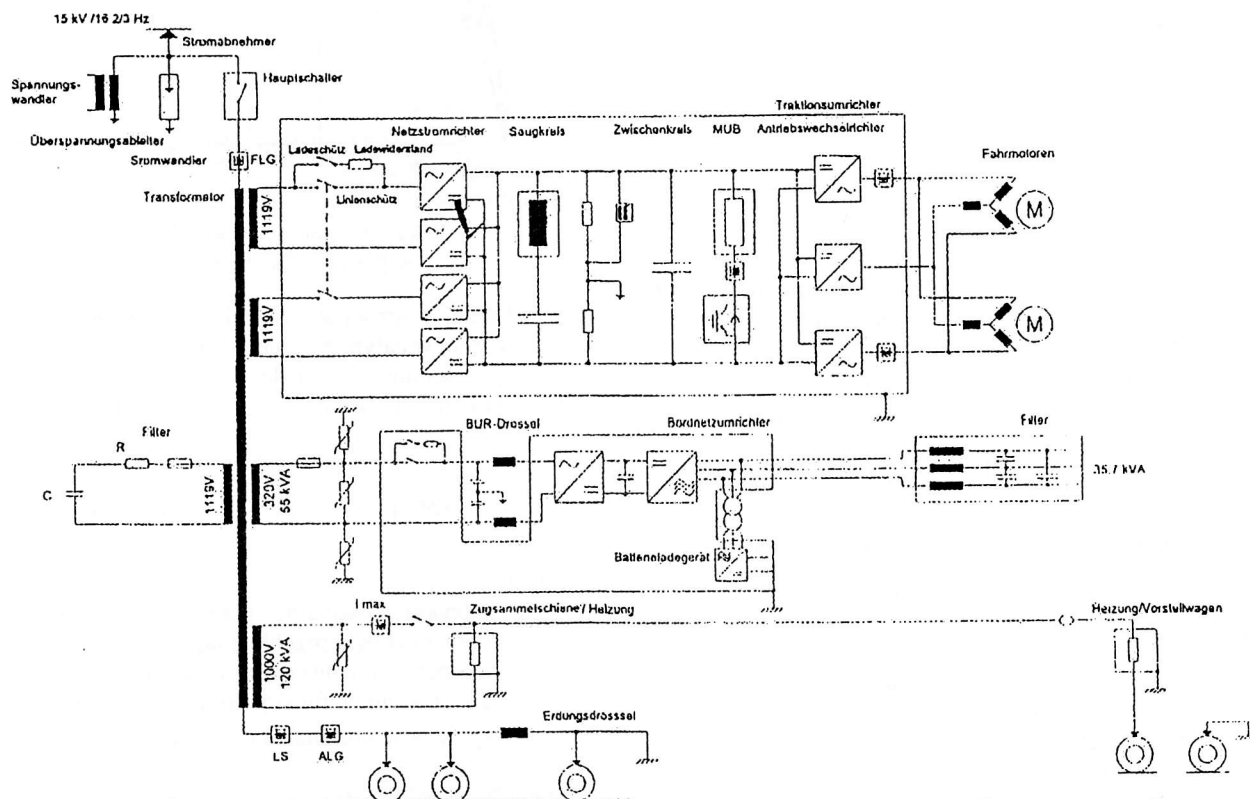


Rys. 9. Przykładowy schemat zasilania autobusu z sieci trakcyjnej prądu stałego

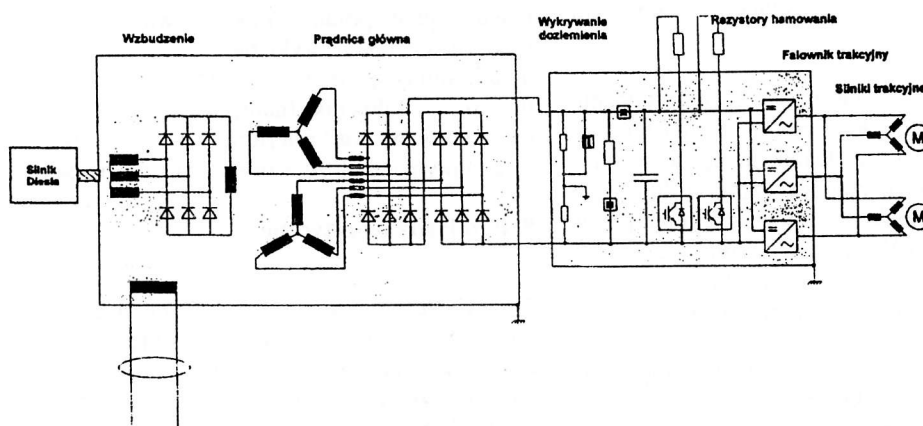
(HS – wyłącznik szybki, LF – filtr sieciowy, SH – stycznik sieciowy, SL+RL – układ ładowania filtra, UF1(2) – napięcie na kondensatorze CF1(2), RB1(2) – opornik hamulca, 11+22 – tranzystory IGBT, LS11+22 – diody filtra falownika, CD – kondensator filtra falownika i UD – napięcie zasilania falownika)

Po wyznaczeniu przebiegów momentu obrotowego silnika i mocy rozruchowej dla układu koło – szyna możliwe jest przejście do określenia poboru energii ze źródła zasilania lub paliwa. Należy uwzględnić łańcuch przetwarzania energii tworzony przez kolejne urządzenia przetwarzające energię, niezależnie od tego, jaki rodzaj przetwarzania wchodzi w rachubę. Do tego celu konieczna jest znajomość sprawności energetycznej urządzeń, a dla autobusów zasilanych z

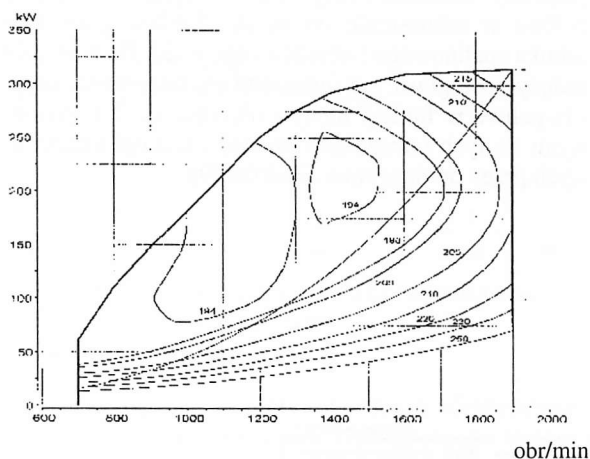
prądnicy autonomicznej także znajomość zużycia paliwa w odniesieniu do mocy chwilowej na wale silnika spalinowego i obrotów tego wału. Do tego celu należy posługiwać się rodzinami charakterystyk zużycia paliwa w funkcji mocy i obrotów silnika, podobnymi do tych pokazanych na rys. 12, a opracowywanych przez producentów silników [9].



Rys. 10. Przykładowy schemat zasilania autobusu z sieci trakcyjnej prądu przemiennego (istotne dla analizowanych zagadnień są następujące elementy: fahrmotoren – silnik trakcyjny, traktionsumrichter – przekształtnik trakcyjny; antriebswechselrichter – falownik napędu, netzstromrichter – przekształtnik sieciowy)



Rys. 11. Przykładowy schemat zasilania napędu autobusu z autonomicznej prądnicy



Rys. 12. Przykładowa charakterystyka zużycia paliwa silnika głównego autobusu szynowego (w g/kWh) - w funkcji mocy i prędkości obrotowej wału silnika

Do wyznaczania całkowitej mocy chwilowej pobieranej w kolejnych, w dowolnie dobranych odcinkach czasowych, dla obu typów źródeł, można posługiwać się następującymi zależnościami:

- dla źródła zewnętrznego (sieć trakcyjna):

$$P_{\Sigma 1} = P_n(v) \cdot \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_f \cdot \eta_c \quad (13)$$

- dla źródła wewnętrznego (silnik spalinowy):

$$P_{\Sigma 2} = P_n(v) \cdot \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_f \cdot \eta_g \quad (14)$$

gdzie:

$P_{\Sigma 1}$ – całkowita moc chwilowa pobierana z sieci trakcyjnej w [W],

$P_{\Sigma 2}$ – całkowita moc chwilowa pobierana z silnika spalinowego w [W],

$P_n(v)$ – moc chwilowa na kołach napędnych w [W] (wyznaczana może być na bazie wzoru (8),

η_p – sprawność przekładni,

η_s – sprawność silnika trakcyjnego,

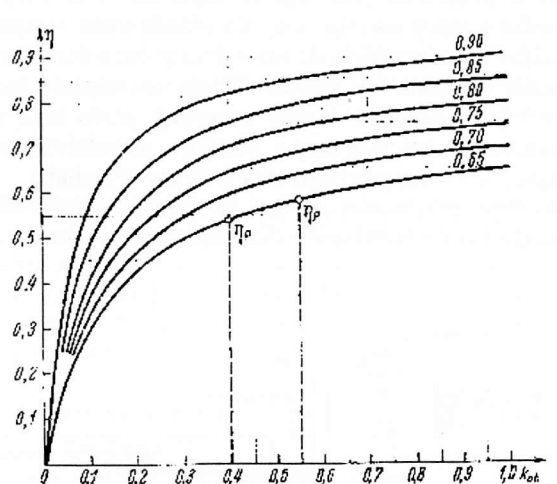
η_f – sprawność falownika trakcyjnego,

η_c – sprawność przekształtnika sieciowego,

η_g – sprawność prądnicy zasilanej spalinowym silnikiem głównym.

W przypadku braku konieczności przekształcania energii przez przekształtnik sieciowy (co ma miejsce przy bezpośrednim przekształcaniu napięcia w układzie z wymuszonym podziałem napięcia lub przy niskim napięciu nominalnym sieci trakcyjnej prądu stałego, np. poniżej 1 kV) należy przyjmować sprawność równą $\eta_c = 1$. Dotyczy to przypadków symulacji za pomocą uniwersalnych programów komputerowych.

Przy mocno zmiennej wartości momentu napędowego przenoszonego przez przekładnię między silnikiem trakcyjnym i kołem napędym, jej sprawność jest również mocno zmienna, co przedstawione jest na rys. 13, zawierającym poglądową charakterystykę sprawności względem przenoszonego momentu [1].



Rys. 13. Zależność sprawności przekładni zębatych od współczynnika obciążenia k_{ob}

Dla każdej wartości k_{ob} różnej od 1 (co ma miejsce praktycznie w całym przebiegu siły trakcyjnej w funkcji prędkości autobusu) należy obliczyć aktualną wartość sprawności przekładni z poniższej zależności [2]:

$$\eta_p = \frac{M(v)}{M(v) + 0.6\eta_{pn}(1 - \eta_{pn})(M - M(v))} \quad (15)$$

gdzie:

M – moment nominalny przekładni (dla którego dobierana była przekładnia),

$M(v)$ – moment realizowany na wale silnika trakcyjnego, zmienny w funkcji prędkości autobusu,

η_{pn} – sprawność nominalna przekładni zębatej.

Specyficznym zagadnieniem w układzie napędowym autobusu zasilanego z prądnicy jest zużycie paliwa przez silnik napędowy tej prądnicy. Wymagana dla określonego przebiegu siły na obwodzie kół chwilowa moc wyjściowa prądnicy jest zmienna, zatem dla zminimalizowania zużycia paliwa, celowe jest sterowanie obrotami silnika spalinowego tak, by przy wymaganej przez prądnicę mocy na wale, zużycie paliwa było wg charakterystyki na rys. 12 minimalne. Cały układ: silnik spalinowy – prądnica (napięcie, częstotliwość) – falownik (napięcie, częstotliwość) może być sterowany wg kryterium obrotów silnika spalinowego optymalnych ze względu na zużycie paliwa.

8. Przejazdy teoretyczne

Po wyznaczeniu wszystkich niezbędnych zależności dotyczących napędu, wykorzystując odpowiednie zależności określające przemieszczanie się autobusu, można wykonać obliczenia tzw. przejazdów teoretycznych na odcinku miarodajnym dla przewidywanej trasy lub na całej trasie.

Przydatne tutaj będą równania ruchu:

$$t = [m_p(1 + \alpha) + m_o] \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{F_n - F_o} \quad (16)$$

$$S = [m_p(1 + \alpha) + m_o] \int_{v_1}^{v_2} \frac{v \cdot dv}{F_n - F_o} \quad (17)$$

Trudności w rozwiązywaniu całek polegają na tym, że zmienne w równaniu są przedstawiane w postaci tablic lub wykresów, zatem w postaci trudnej do przetworzenia na postać analityczną. Można je co prawda aproksymować wieloma metodami matematycznymi, np. wielomianami Czebyszewa [2], jednak wygodniejsze jest zastąpienie różniczki przyrostami skończonymi, a całki sumą. Zatem

$$t = [m_p(1 + \alpha) + m_o] \sum_{v_1}^{v_2} \frac{\Delta v}{F_n - F_o} \quad (18)$$

$$S = [m_p(1 + \alpha) + m_o] \sum_{v_1}^{v_2} \frac{v + 0.5\Delta v}{F_n - F_o} \Delta v \quad (19)$$

Oznaczenia w powyższych wzorach są takie jak w podanych wcześniej.

Kolejność wykonywania obliczeń przejazdu teoretycznego może zostać zaczerpnięta z [8].

9. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych zależności można przeprowadzić zarówno uproszczone obliczenia trakcyjne jak i, po opracowaniu odpowiedniego programu, symulacje komputerowe. Kolejność ich wykonywania zależy od celu, jakiemu mają służyć. Na przykład przy projektowaniu napędu w pierwszej kolejności będzie

wykorzystywana zależność na wyznaczenie sił dla wytypowanego przyspieszenia wg wzoru (1), a ostatnią wyznaczenie mocy silnika i zużycie energii lub paliwa. Przy obliczeniach parametrów istniejącego autobusu np. na nowej trasie przejazdu przyspieszenie z tego samego wzoru będzie obliczane w dalszej kolejności.

Literatura

- [1] Andrejew W.P., Sabinin J.A.: *Podstawy napędu elektrycznego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1966
- [2] Durzyński Z.: *Dobór napędu zespołów trakcyjnych prądu stałego metodą symulacji przejazdów*. Rozprawa doktorska. Poznań 1987
- [3] Durzyński Z., Kaczmarek E.: *Zasady wyznaczania charakterystyk trakcyjnych autobusów szynowych z różnymi rodzajami układów napędowych*. Praca w ramach projektu badawczego nr 9T12CO4919 (niepublikowana). Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor” w Poznaniu. Poznań 2002
- [4] Gąsowski W., Durzyński Z., Marciniak Z.: *Elektryczne pojazdy trakcyjne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1995
- [5] Hondius H.: *Der RAB 2/6 für die Mittelthurgaubahn*. Stadtverkehr nr 1/1999
- [6] Kacprzak J., Koczara W.: *Podstawy napędu elektrycznego pojazdów trakcyjnych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1990
- [7] Kućmin J., Skalski S.: *Rebus – autobus szynowy z Adtranz Pafawag dla PKP*. Przegląd Kolejowy nr 5/1998
- [8] Podoski J., Kacprzak J., Mysłek J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 1980
- [9] Powerpack 6R 183 TD13H. *Materiały firmowe MTU*. Friedrichshafen 2000.
- [10] *Materiały techniczne f-my Voith*. 2002