

Jacek Pytel

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI TRAKCYJNYCH I BILANS ENERGII LOKOMOTYWY Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM Z MAGNESAMI TRWAŁYMI, Z ZASTOSOWANIEM W REKREACYJNEJ KOLEJCE PARKOWEJ

ANALYSIS OF TRACTION PROPERTIES AND VEHICLE'S ENERGY BALANCE FOR LOCOMOTIVE WITH SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET MOTOR WITH APPLICATION IN RIDABLE MINIATURE RAILWAY

Streszczenie: Artykuł opisuje koncepcję wykonania modelu lokomotywy w skali 1:6 napędzanej silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, zasilanej bateriami trakcyjnymi, mającej zastosowanie np. w parkach rozrywki oraz w miejscach poświęconych popularyzacji techniki kolejnictwa. Przedstawiona koncepcja oparta jest o założenia eksploatacyjne i obejmuje wykonanie modelu wstępnego lokomotywy i wzorowana jest dokumentacją oryginału, tj. lokomotywy typu 6D1 kolei normalnotorowej. W oparciu o przedstawione dane wejściowe oraz masę modelu, wykonano obliczenia właściwości trakcyjnych oraz bilansu energetycznego układu napędowego i zasilania. Analiza przedstawiona w niniejszej publikacji stanowi wstęp do dalszego studium wykonania lokomotywy.

Abstract: This paper presents a concept of performing an electric locomotive 1:6 scale model with synchronous permanent magnet motor, powered by traction batteries. The model is dedicated to use in e.g. theme parks or any other places related to popularisation of railway technique. The concept is presented on the basis of operational assumptions and encompasses initial modelling in accordance with original documentation of regular-size standard gauge locomotive class 6D1. On the basis of assumed operational data and predicted mass of the model, the analysis of traction properties and energy balance for propulsion and power supply was performed. Aforementioned analysis makes an introduction to further technical and feasibility study.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, kolej, właściwości trakcyjne, bilans energii, akumulatory trakcyjne
Keywords: electrical machines, railway, traction properties, energy balance, traction batteries

1. Wstęp

Kolej parkowa jest koleją wąskotorową lub modelem kolei w określonej skali, mającym charakter rekreacyjny. W dużej mierze powszechna stała się w krajach anglosaskich i jest znana jako [ang.] *ridable miniature railway* względnie *children's railway* oraz [niem.] *Liliputbahn*. Pierwotnie urządzenia w takiej skali, były stosowane również jako modele mające na celu popularyzację techniki kolejnictwa. Kolej ta występuje w parkach rozrywki lub miejscach poświęconych technice kolejowej, takich jak skanseny i muzea. Jedną z funkcjonujących w Polsce jest Kolejka Parkowa w Cichowie [1]. Ze względu na zainteresowanie parku w Cichowie, opracowano koncepcję lokomotywy elektrycznej w skali 1:6, zasilanej z akumulatorów, wzorowanej na bazie lokomotywy normalnotorowej (rozstaw szyn $9\frac{1}{2}$ "', czyli 241 mm). Lokomotywa miała na celu zastąpienie eksploatowanego aktualnie modelu lokomo-

tywy SM42 (6D) (Rys. 1) napędzanej silnikiem spalinowym. Zaproponowano model lokomotywy 6D1, będący wersją rozwojową poprzedniczki 6D. Wyboru dokonano ze względu na docelowe warunki eksploatacji i ergonomię użytkowania oraz technologiczność.



Rys. 1. Model lokomotywy SM42 [2]

2. Założenia

Rozważany model ma spełniać następujące warunki:

- Baza projektu – lokomotywa typu 6D1;
- Skala modelu 1:6;
- Napęd elektryczny zasilany akumulatorami;
- Okres eksploatacji: wiosna, lato, jesień;
- Płynny rozruch;
- Zdolność do jazdy po torze w pętli o długości 1 km, o rozstawie szyn 241 mm, o maksymalnym nachyleniu 2‰ przez połowę długości trasy;
- Minimalny promień łuku w eksploatowanym torze: 8,3 m;
- Zdolność uciążu składu o masie ok. 1 t z prędkością max 30 km/h;
- Czas jednego kursu: 8 min;
- Średnia ilość kursów na dzień: 16;
- Zdolność do jazdy przez dzienny okres eksploatacji (8 godzin) bez konieczności doładowania akumulatorów.

3. Koncepcja [3]

Przed ujęciem analitycznym rozpoczęto projekt modelu lokomotywy we właściwej skali, uwzględniając dostępne technologie i materiały. Podstawowym warunkiem projektu jest wierne odwzorowanie postaci i wymiarów lokomotywy rzeczywistej, co narzuca ograniczenia względem przestrzeni do zabudowy układu napędowego. Wykonanie modelu w odniesieniu do narzuconej skali determinuje dane wejściowe do dalszej analizy projektu niezbędnej pod kątem funkcjonowania pociągu, zwłaszcza przy określonych warunkach trakcyjnych. Najważniejsze dane wejściowe to: masa pojazdu, średnice kół, wymagane przełożenia. Znane są ograniczenia wymiarowe wewnątrz lokomotywy, do których należy dostosować elementy układu zasilania i napędu. Zestawienie modelu w porównaniu z oryginałem prezentują Rys. 2 i 3.



Rys. 2. Wizualizacja modelu lokomotywy



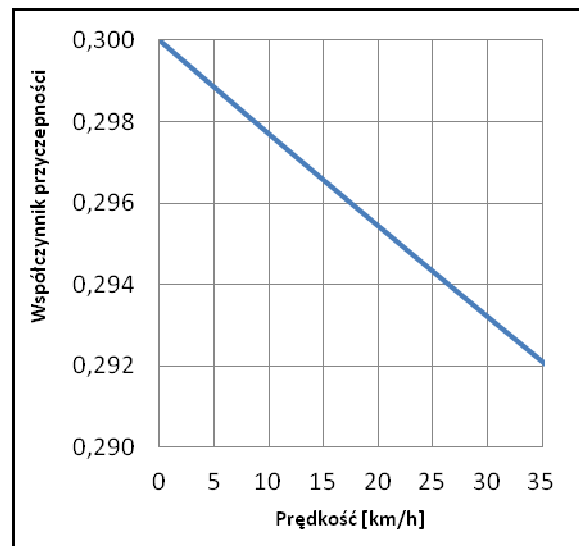
Rys. 3. Lokotywa 6D1 - pojazd wzorcowy [4]

4. Analiza właściwości trakcyjnych

Istotnym parametrem jest masa lokomotywy – około 500 kg wraz z operatorem. Zdolność pociągowa lokomotywy w zakresie niewielkich prędkości zależy liniowo od jej masy oraz współczynnika przyczepności, który przyjmuje wartości z zakresu 0,15-0,33. Wyższa wartość oznacza lepsze warunki przyczepności i maleje w funkcji prędkości (Rys. 4), zgodnie ze wzorem empirycznym Parodi'ego [5]:

$$f_L = \frac{f_{L0}}{1 + 0,01v} \quad (1)$$

gdzie: v – prędkość lokomotywy,
 $f_{L0} = 0,33$ dla szyn suchych,
 $f_{L0} = 0,15$ dla szyn mokrych.



Rys. 4. Zależność współczynnika przyczepności od prędkości lokomotywy

Dla potrzeb projektu przyjęto $f_{L0} = 0,3$. Istotne jest, by wypadkowa siła pociągowa nie przekraczała wartości wynikającej z iloczynu ciężaru i współczynnika przyczepności lokomotywy.

Kolejnym etapem obliczeń jest wyznaczenie oporów ruchu w funkcji prędkości. Korzystano ze wzorów empirycznych przyjętych dla kolei normalnotorowej. Na opory ruchu składają się [1]:

- Opory ruchu pociągu:

$$W_f = mg[1 + 0,0002(v + v_w)^2] \quad (2)$$

gdzie:

m – masa całkowita pociągu [t],

v – prędkość jazdy [m/s],

v_w – prędkość wiatru [m/s],

- Opory wynikające z przyspieszenia:

$$W_{acc} = a(m_l \xi_l + m_w \xi_w) \quad (3)$$

gdzie:

$a = 0,2$ – założone przyspieszenie ruchu [m/s²],

$m_{l,w}$ – masa lokomotywy i wagonów, kolejno 500 i 1000 [kg],

$\xi_{l,w}$ – współczynnik mas wirujących dla lokomotywy i wagonów – przyjęto wartości kolejno 1,3 i 1,04.

- Opory ruchu w łuku:

$$W_{cur} = mg \frac{C}{r_{min}} \quad (4)$$

gdzie:

m – masa całkowita pociągu [t],

$g = 9,81$ [m/s²],

$C = 800$,

$r_{min} = 8,3$ [m],

- Opory profilu linii:

$$W_g = mgsina \quad (5)$$

gdzie: $\alpha = 0,002$ [rad].

W analizie pominięto prędkość wiatru v_w .

Wszystkie wartości (2-5) oporów ruchu wyra-

żone są w [N]. Są to wzory stosowane dla kolei normalnotorowej, zwłaszcza przy analizie kolei dużych prędkości. Składowa oporu ruchu (2) zależna od prędkości wykazuje bardzo mały przyrost w funkcji prędkości. Dla rozważanego zakresu, tj. do 10 m/s, sumaryczny opór ruchu W jest praktycznie stały i wynosi 1,214 kN. Znając sumaryczny opór ruchu W i zakładaną maksymalną prędkość jazdy v_{max} (30 km/h) obliczono, że moc układu napędowego powinna być większa niż 10,2 kW według zależności (6).

$$P > Wv_{max} \quad (6)$$

Istotne przy projektowaniu układu napędowego jest, by siła napędowa nie przekraczała dopuszczalnej siły pociągowej (7), zależnej od współczynnika przyczepności f_L .

$$F_{per} = f_L(v) \cdot m_l g \cos\alpha \quad (7)$$

W tym celu na wspólnym wykresie (Rys. 5) zestawiono prostą oporów ruchu oraz krzywe prezentujące dopuszczalną i maksymalną siłę pociągową. Maksymalna siła pociągowa (7) pochodzi z charakterystyki dobranej silnika oraz zależy od promienia koła lokomotywy, przełożenia i sprawności przekładni.

$$F_{max} = \frac{M(n) \cdot i \eta}{r} \quad (8)$$

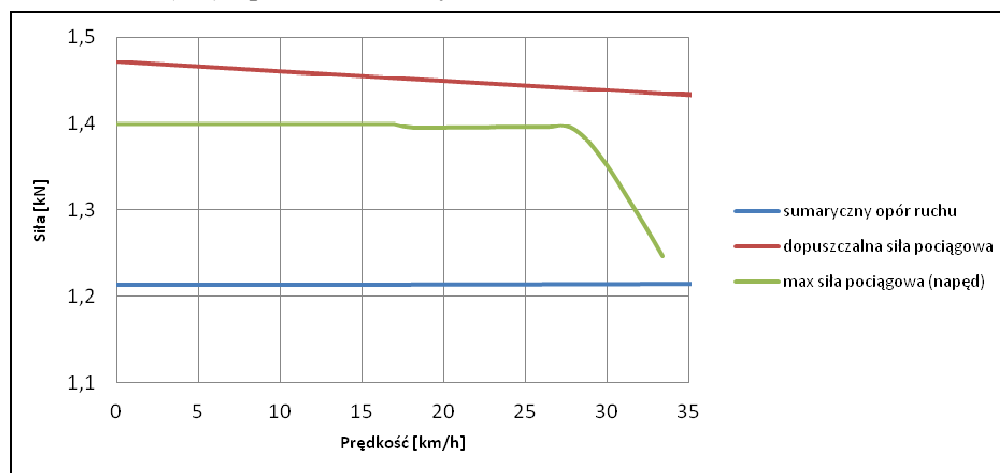
gdzie:

$M(n)$ – moment obrotowy na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej n ,

i – przełożenie przekładni,

η – sprawność przekładni,

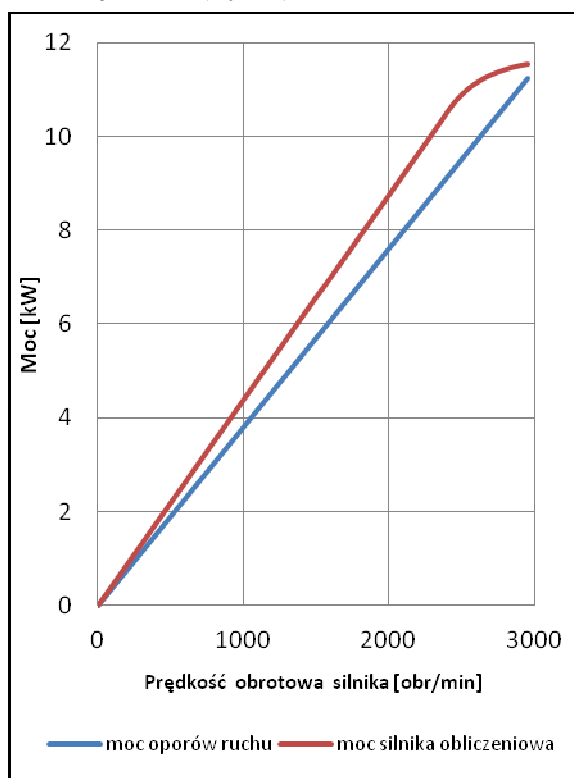
r – promień koła lokomotywy.



Rys. 5. Charakterystyka trakcyjna modelu lokomotywy

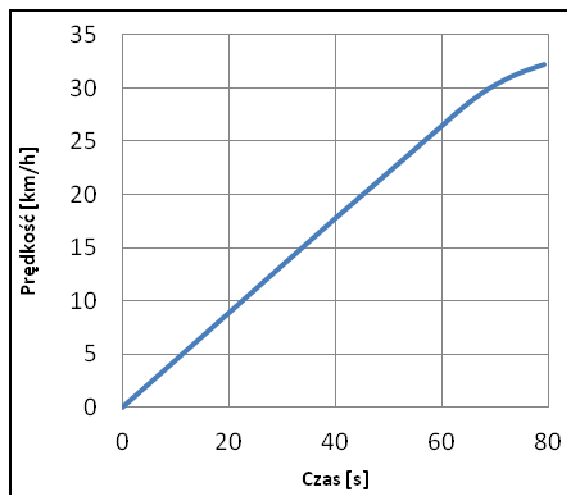
Promień koła $r = 90$ mm został przyjęty, mając bardziej na uwadze właściwości trakcyjne pojazdu aniżeli samo odwzorowanie pochodzące z przyjętej skali modelu. Dla tej wartości oś lokomotywy przy prędkości 30 km/h obraca się z prędkością 834 obr/min. Z uwagi na ograniczenia gabarytowe, wskazane jest zainstalowanie silnika o wzniosie wału nie większym niż 90 mm. Dla tej wielkości można dobrać silnik o mocy maksymalnej 12 kW i prędkości obrotowej max 3000 obr/min. W celu zredukowania prędkości i zwiększenia momentu na oś napędzaną, dobrano przekładnię zębatą kątową o przełożeniu $i = 3$ i sprawności $\eta = 0,9$.

Znając różnicę pomiędzy mocą oporów ruchu zredukowaną na wał wejściowy przekładni a mocą dobranego silnika (Rys. 6), obliczono rzeczywistą wartość przyspieszenia ruchu pociągu i przedstawiono na wykresie prędkości w funkcji czasu (Rys. 7).



Rys. 6. Różnica między mocą oporów ruchu, a mocą silnika

Należy wziąć pod uwagę, że rozpatrywane wartości dotyczą ruchu przy spiętrzeniu niekorzystnych warunków, praktycznie nie występujących jednocześnie w warunkach eksploatacji kolejki parkowej, tzn. uwzględniono jazdę przy nachyleniu toru w łuku o minimalnym promieniu.



Rys. 7. Szacowane przyspieszenie ruchu

Dla konstrukcji rzeczywistej modelu należałoby zbadać faktyczny wpływ bezwładności mas wirujących, gdyż przyjęte współczynniki wpływu w równaniu (3) są stosowane dla kolei normalnotorowej. Wartość współczynnika ξ_i dla lokomotywy, przy znanych momentach bezwładności osi napędowych i tocznych, przekładni zębatej oraz wirnika silnika może być mniejsza niż jest zakładana. Obliczeniowa wartość współczynnika ξ_i według równania (9) wynosi 1,10. Wartość niższa niż przyjęta, o ile jest rzeczywista, wpłynie korzystnie na obliczone parametry trakcyjne.

$$\xi_i = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{n I_{0n}}{m_i r_n^2} \quad (9)$$

gdzie:

n – liczba mas wirujących,

I_{0n} – masowy moment bezwładności masy wirującej,

m_i – masa lokomotywy (500 kg),

r_n – promień bezwładności masy wirującej.

5. Dobór napędu i zasilania

W ostatniej dekadzie, Instytut KOMEL opracował wiele elektrycznych układów napędowych z silnikami z magnesami, które znalazły zastosowanie w konkretnych pojazdach [6]. Przy doborze silnika napędowego do lokomotywy kierowano się dotychczas zdobytym doświadczeniem. W związku z tym, zastosowano ośmiobiegunowy silnik typu SMwsk90L8 (produkcji KOMEL), dla którego, by uzyskać wymaganą prędkość obrotową wymagane jest zasilanie o częstotliwości 200 Hz. Do sterowania silnikiem dedykowany jest falownik Sevcon Gen4 Size 4. Zgodnie z założeniami,

pociąg wykonuje średnio 16 ósmiominutowych kursów na dzień. Za czas rozruchu przy maksymalnym poborze prądu przyjęto szacowany czas przyspieszenia do 30 km/h przy pełnym obciążeniu, tj. ok. 60 s. Jest to czas t_{acc} poboru szczytowej wartości prądu, który przy 16 kursach na dzień trwa łącznie 16 min. Poprzez pozostały czas, tj. $t_{end} - t_{acc} = 112$ min. dziennie, pociąg porusza się ruchem jednostajnym. Sprawność η całego układu napędowego wynosi 77%, uwzględniając sprawność przekładni (90%), silnika (90%) i falownika (95%). Przyjmując do obliczeń stałą prędkość $v = 30$ km/h oraz opory ruchu o wartości $F_{max} = 1,214$ kN dla okresu ruchu przyspieszonego oraz $F_{nom} = 0,96$ kN dla okresu, w którym pociąg porusza się ruchem jednostajnym (z pominięciem oporu wynikającego z przyspieszenia) po torze płaskim, wymaganą dzienną pojemność Q akumulatorów o napięciu $U = 48$ V szacuje się na 763 Ah wg zależności (10).

$$Q = \frac{1,6}{U \frac{\eta}{100}} \left(\int_{t_0}^{t_{acc}} F_{max} v dt + \int_{t_{acc}}^{t_{end}} F_{nom} v dt \right) \quad (10)$$

Współczynnik o wartości 1,6 jest współczynnikiem rozładowania akumulatora, który uwzględnia się przy szacowaniu jego pojemności. Obliczona wartość energii (10) nie jest jednak nominalną pojemnością akumulatora. Pojemność nominalna ogniów kwasowo-ołowiowych jest podawana przez producentów dla 20 °C. Mając na uwadze, że kolejka eksploatowana jest w okresie letnim, a akumulator znajduje się pod stałym poszyciem lokomotywy, przy 33 °C akumulator traci 50% nominalnej pojemności. Przy rozładowaniu akumulatora poniżej 50% jego nominalnej pojemności, żywotność cykliczna skraca się trzykrotnie. Korzystnie jest stosować akumulator o pojemności wyższej niż minimalna wymagana. Z uwagi na temperaturę pracy oraz niezdatność do głębokiego rozładowania (poniżej 1,7 V na ogniwo 2 V), stosowanie akumulatorów kwasowo-ołowiowych jest niezalecane. Zalecane jest użycie baterii trakcyjnych żelowych lub litowo-

żelazowo-fosforanowych LiFePO₄. Ważną zaletą baterii LiFePO₄ są mniejsze wymiary w porównaniu do baterii żelowych, jednak ich cena pozostaje bardzo wysoka. Warto zwiększyć pojemność akumulatorów, tak by rozładowujący je prąd godzinny był możliwie mniejszy niż dopuszczalny przez producenta.

6. Podsumowanie

Z uwagi na duże zapotrzebowanie względem pojemności akumulatorów, rozmieszczenie ich wewnątrz lokomotywy, w przestrzeni ograniczonej jej poszyciem, może okazać się niemożliwe. O ile możliwe jest umieszczenie akumulatorów w osobnym wagonie pociągu, to powoduje to zwiększenie jego biernej masy, a zatem możliwe pogorszenie właściwości trakcyjnych lokomotywy. Należy również mieć na uwadze, że przedstawiona analiza właściwości trakcyjnych powstała w oparciu o empiryczne modele obliczeniowe dla kolei normalnotorowej, charakteryzującej się jazdą przy ustalonych i znormalizowanych parametrach dotyczących profilu koła jezdnego oraz szyny. Wyniki przedstawione w niniejszej analizie wraz z modelem wstępnym stanowią dane wejściowe do doboru pozostałych podzespołów lokomotywy, takich jak rama pojazdu, zawieszenie oraz hamulce. Z uwagi na obszerny opis dalsza analiza wymaga ujęcia w odrębnym artykule.

7. Literatura

- [1]. https://pl.wikipedia.org/wiki/Kolej_parkowa.
- [2]. http://www.krzywlin.pl/Prosze_wsiadac_odjazd!_9231.html [dostęp 20-02-2018].
- [3]. Opracowanie wewnętrzne Komel: „Projekt modelu lokomotywy 6D1 w skali 1:6 dla kolejki parkowej”, nr CG4-050142, praca nigdzie niepublikowana.
- [4]. www.transportszynowy.pl.
- [5]. Lipiński L., Miszewski M.: „Wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi”, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, nr 1/2012 (94), str. 70-72.
- [6]. Gawron S.: „Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania”, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe nr 1/2016 (109), str. 1-10.