

EUGENIUSZ KAŁUŻA*

ANALIZA CZYNNIKÓW OGRANICZAJĄCYCH
PARAMETRY TRAKCYJNE LOKOMOTYW
ELEKTRYCZNYCH O UKŁADZIE OSI C₀-C₀,
ZASILANYCH Z SIECI 3 KV DCLIMITING FACTORS OF 3000 V DC CO'CO'
LOCOMOTIVES MAXIMUM PERFORMANCE

Streszczenie

W artykule opisano zjawiska związane z punktem styku pomiędzy kołem kolejowym a szyną, przy założeniu przyłożenia do rozpatrywanego obiektu dużej siły rozruchowej. Przyłożenie nadmiernych sił powoduje występowanie poślizgów jak również wewnętrznych mikropęknięć kół pojazdów trakcyjnych, w związku z czym skraca się czas eksploatacji opisywanego obiektu, a co za tym idzie zwiększają się koszty utrzymania. Jednocześnie istniejący system trakcyjny w Polsce jest w stanie spełnić zapotrzebowanie na moc nowoczesnych lokomotyw przekształtnikowych przekraczających 5 MW. Jednakże przewidywane kapitałowe inwestycje w polskie drogi kolejowe zostały ograniczone do kilku najistotniejszych linii. Wnioskiem końcowym artykułu jest stwierdzenie, iż nie jest wskazane wykorzystywanie lokomotyw przekształtnikowych przekraczających 5 MW o układzie osi C0C0 w istniejącym systemie dróg kolejowych.

Słowa kluczowe: poślizg kół, układ koło-szyna, przyczepność, trakcja

Abstract

Current trends in locomotive industry marketing exploit maximum power of the unit and start-up forces. The article describes phenomena occurring on wheel/rail contact point during start with high force. Excessive forces cause frequent slip leading to chipping of wheel thread and internal fractures of the wheel. Above significantly reduces the service life span and increases maintenance costs. Simultaneously the existing traction supply system in Poland is mainly incapable to meet power requirements of modern locomotives exceeding 5 MW. Foreseeable capital investment in Polish railroads will limit modernization to few vital lines. Final conclusion of the article shows that it is not advisable to implement Co'Co' freight locomotives exceeding 5 MW into existing railroad system.

Keywords: wheel slip, wheel-rail contact, adhesion, traction

* Dr hab. inż. Eugeniusz Kałuża, prof. PŚL, Zakład Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej, Politechnika Śląska.

1. Wstęp

Opisaną w artykule analizę przeprowadzono dla lokomotyw:

- napędzanych silnikami asynchronicznymi zasilanymi z sieci trakcyjnej 3 kV DC poprzez przekształtniki,
- przeznaczonych do prowadzenia składów wagonów towarowych o masie nieprzekraczającej 3200 t,
- o masie przypadającej na oś nieprzekraczającej 20 t.

Parametrami technicznymi lokomotywy wyznaczającymi jej możliwości trakcyjne są:

- w zakresie niskich prędkości – masa lokomotywy,
- w zakresie wyższych prędkości jazdy – moc i masa lokomotywy.

Realne możliwości trakcyjne każdej lokomotywy pracującej w określonej infrastrukturze kolejowej będą pokrywały się z jej znamionowymi parametrami trakcyjnymi lub będą zgodne z jej charakterystyką trakcyjną pod następującymi warunkami:

- aktualne warunki współpracy kół lokomotywy z szynami pozwolą na uzyskanie sił pociągowych wynikających z charakterystyki trakcyjnej lokomotywy [9],
- napięcie sieci trakcyjnej mierzone na odbieraku będzie się zawierało w określonym przez producenta lokomotywy dopuszczalnym zakresie zmian,
- dopuszczalne obciążenie sieci trakcyjnej będzie wyższe od prądu obciążenia lokomotywy pracującej ze znamionowo obciążonymi silnikami trakcyjnymi i urządzeniami pociągowymi.

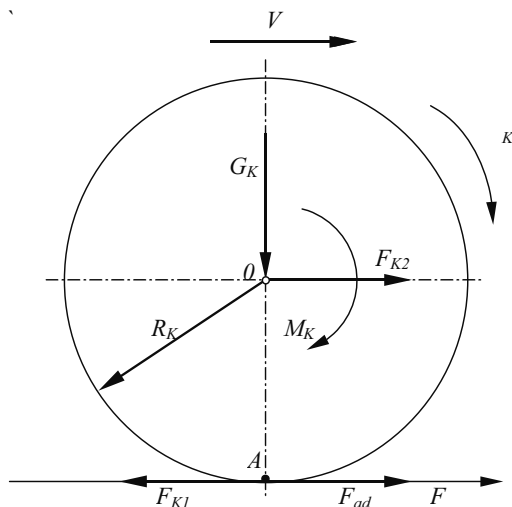
2. Aspekty pracy lokomotywy w zakresie wysokich wartości poślizgów kół

Ruch pojazdów trakcyjnych odbywa się pod wpływem siły pociągowej powstającej w wyniku momentu obrotowego działającego na oś koła napędzanego silnikiem oraz siły przyczepności występującej na styku koła z szyną lub nawierzchnią.

W pojazdach szynowych nacisk koła na szynę jest duży. Naprężenie od siły nacisku kół lokomotywy elektrycznej [10] dla szyn zużytych wynosi 21 300 N/cm², zaś dopuszczalne naprężenie zmęczeniowe dla stali węglowej 85 P wynosi 22 000 N/cm². Uwzględniając jeszcze siły pochodzące od momentu obrotowego, naprężenia na styku koła z szyną mogą przekroczyć granicę plastyczności, a współpracę koła z szyną można rozpatrywać jako pewnego rodzaju walcowanie na zimno [10]. W tych warunkach na styku koła z szyną ulega zmianie struktura materiału oraz działanie nie tylko sił tarcia, lecz także sił międzycząsteczkowych [12]. Dlatego też współczynnik przyczepności:

$$\mu = F_{ad} / G_K \quad (1)$$

definiowany jako stosunek siły przyczepnej F_{ad} do nacisku koła G_K (rys. 1), jest większy od współczynnika tarcia.



Rys. 1. Rozkład sił powstających w punkcie styku koła z szyną [10]

Fig. 1. Distribution of forces created at the wheel/rail contact point

Powstawanie siły przyczepności w punkcie styku koła z szyną (punkt A – rys.1) można wyjaśnić następująco. Moment M_K można przedstawić w postaci pary sił F_{K1} , F_{K2} (rys. 1), dla których ramieniem jest promień toczny koła R_K

$$M_K = F_K \cdot R_K \quad (2)$$

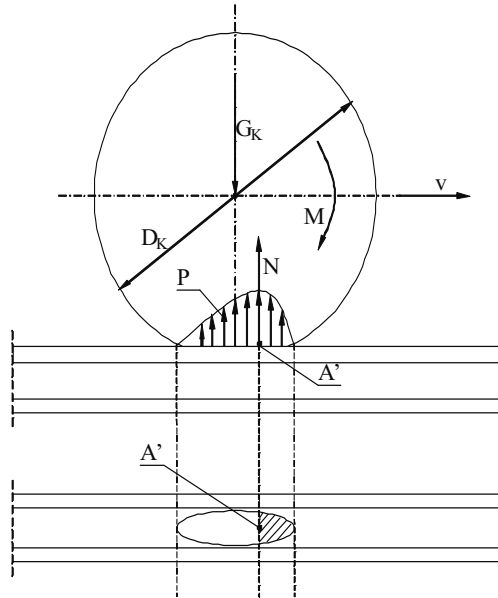
$$\left| \overline{F_K} \right| = \left| \overline{F_{K1}} \right| = \left| \overline{F_{K2}} \right| \quad (3)$$

Siła F_{K1} , skierowana przeciwnie do kierunku ruchu zestawu kołowego, usiłuje wprowadzić punkt oparcia koła o szynę w poślizg zgodnie z kierunkiem jej działania. Jednakże wskutek docisku koła na szynę (siła G_K), w wymienionym punkcie powstaje siła przyczepności (adhezji) F_{ad} , będąca reakcją na działanie siły F_{K1} (III prawo Newtona).

$$\left| \overline{F_{K1}} \right| = \left| \overline{F_{ad}} \right| \quad (4)$$

Wobec powyższego, siła F_{K2} jest w stanie wprowadzić w ruch postępowy oś koła, a wraz z nią cały pojazd, pod warunkiem, że siła ta będzie większa od oporów ruchu pojazdu przypadających na analizowane koło lub oś napędną.

W reżimie pracy trakcyjnej, pod wpływem działania momentu obrotowego M_K , rozkład jednostkowych nacisków p ulega zniekształceniu (rys. 2). Reakcja wypadkowa szyny N przesuwa się z punktu A na rys. 1 do punktu A' na rys. 2.



Rys. 2. Schemat sił działających na napędzane koło pojazdu w czasie pracy trakcyjnej [10]

Fig. 2. Forces acting on the driven wheel of a vehicle during traction work scheme

Występujący w reżimie pracy trakcyjnej elementarny sprężysty poślizg koła (elementarny mikropoślizg) w stosunku do szyny opisać można równaniem [10]:

$$du_{SL} = dx_{\alpha} - R_K \cdot d\alpha \quad (5)$$

gdzie:

dx_{α} – rzeczywiste elementarne przesunięcie środka koła względem szyny w czasie dt ,

$R_K d\alpha = dx$ – elementarne przesunięcie środka koła względem szyny, określone jego promieniem R_K i elementarną zmianą kąta obrotu $d\alpha$ w czasie dt .

W reżimie pracy trakcyjnej $du_{SL} < 0$, natomiast w reżimie hamowania $du_{SL} > 0$.

Względny elementarny poślizg sprężysty można przedstawić w postaci następującej zależności [10]:

$$\frac{du_{SL}}{dx} = \frac{dx - R_K \cdot d}{R_K \cdot d} \quad (6)$$

Badania eksperymentalne wykazały, że istnieje proporcjonalność pomiędzy siłami a wywołanymi deformacjami, czyli pomiędzy siłą przyczepności ($|F_{ad}|=|F_K|$) a względnym poślizgiem sprężystym [10].

$$F_{ad} = k_{ad} \cdot \frac{du_{SL}}{dx} \quad (7)$$

Powyższe przekształcić można do postaci:

$$(8) \quad F_{ad} = k_{ad} \cdot \frac{du_{SL}}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} = k_{ad} \cdot \frac{v_{SL}}{v}$$

gdzie:

v_{SL} – prędkość poślizgu sprężystego,

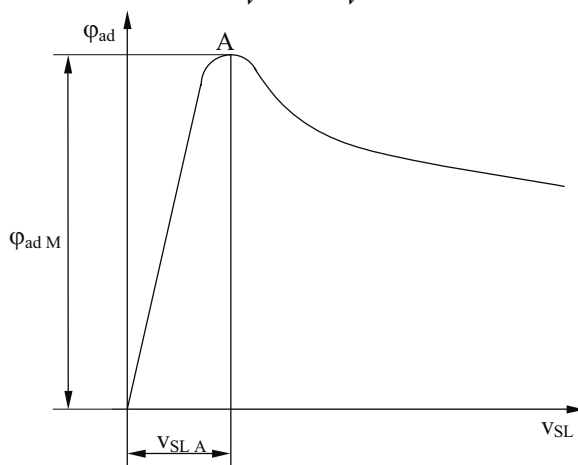
v – prędkość liniowa pojazdu,

k_{ad} – współczynnik zależny od rodzaju materiału koła, jego promienia i nacisku na szynę.

Siła przyczepności F_{ad} koła do szyny jest proporcjonalna do prędkości poślizgu sprężystego v_{SL} włókien materiału bandaża na powierzchni styku koła z szyną, a odwrotnie proporcjonalna do prędkości jazdy v .

Reasumując, można stwierdzić, że w zakresie poślizgu sprężystego – określonego jako mikropoślizg – siła przyczepności jest proporcjonalna do względnej prędkości poślizgu s zdefiniowanej równaniem:

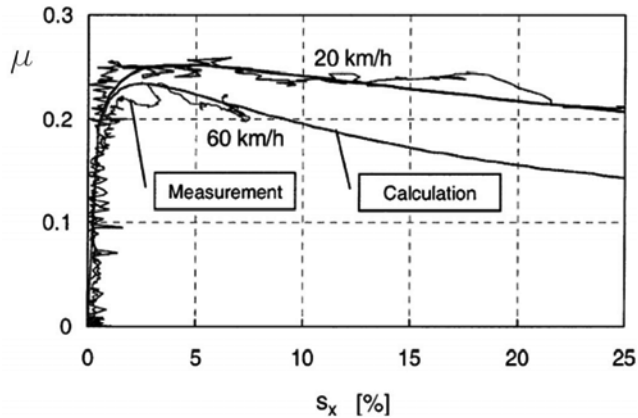
$$s = \frac{v_{SL}}{v} = \frac{\Omega_K R_K}{v} - 1 \quad (9)$$



Rys. 3. Zmiany wartości współczynnika przyczepności μ/μ_M w funkcji prędkości poślizgu v_{SL} dla prędkości jazdy 10 m/s

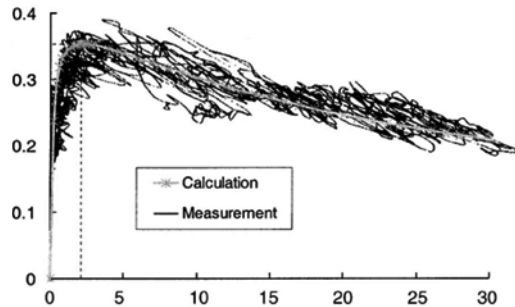
Fig. 3. Adhesion coefficient characteristic as a function of speed slip for the driving speed of 10 m/s

Jeśli prędkość poślizgu v_{SL} przekroczy pewną graniczną wartość, to zostanie naruszona proporcjonalność między siłami a deformacjami. Wtedy siła przyczepności maleje, natomiast prędkość poślizgu rośnie. Zmiany wartości współczynnika przyczepności μ w funkcji prędkości poślizgu przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Model sił przyczepności bazujący na pomiarach lokomotywy Bombardier 12X (mokro, $v = 20$ km/h, $v = 60$ km/h) [9]

Fig. 4. Adhesion forces model based on BOMBARDIER 12X locomotives measurements (wet, $v = 20$ km/s, $v = 60$ km/s)

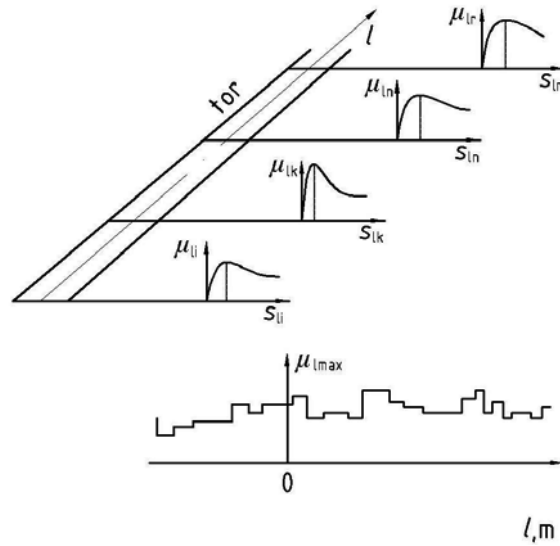


Rys. 5. Model sił przyczepności bazujący na pomiarach lokomotywy SIEMENS S252 (sucho, $v = 30$ km/h) [9]

Fig. 5. Adhesion forces model based on SIEMENS S252 locomotives measurements (dry, $v = 30$ km/s)

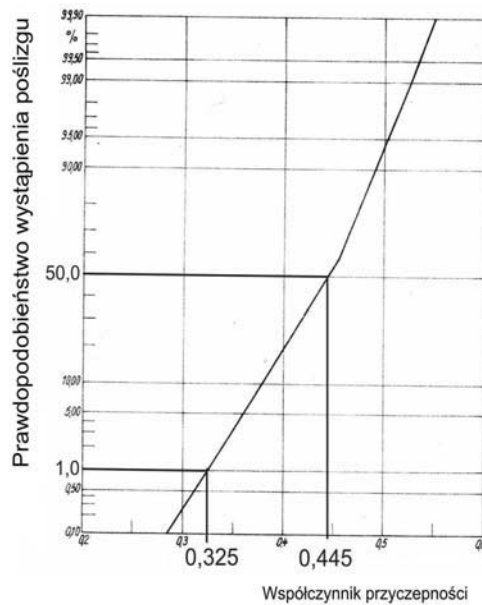
Maksymalna wartość $s = v_{SL}/v$ nie przekracza $0,5 \pm 1\%$. Dla prędkości jazdy $v = 40$ m/s = 144 km/h odpowiada to prędkości poślizgu $v_{SL} = 0,2 \pm 0,4$ m/s. W zakresie zmian s od 0 do s_M (mikropoślizg) wartość μ/μ_M narasta od 0 do 1 (rys. 5). Dla $s > s_M$ koła wpadają w pełny poślizg (buksovanie kół) określony jako makropoślizg. Makropoślizgowi towarzyszy spadek wartości współczynnika przyczepności.

Wartości współczynnika przyczepności μ_{\max} , jak i odpowiadające im wartości poślizgu s_b , ulegają ciągłym zmianom w funkcji drogi (rys. 6), a prawdopodobieństwo wpadnięcia kół lokomotywy w poślizg wzrasta znacznie wraz ze wzrostem stopnia wykorzystania przyczepności (rys. 7).



Rys. 6. Zmiany współczynnika przyczepności μ_{lmax} i wartości poślizgu s_i w funkcji drogi [1]

Fig. 6. Adhesion coefficient changes and values of slip as a function of road



Rys. 7. Prawdopodobieństwo wystąpienia poślizgu w funkcji współczynnika przyczepności [11]

Fig. 7. Slip occurrence probability as a function of adhesion coefficient

Wyniki pomiarów sił przyczepności przeprowadzone na lokomotywach Bombardier 12X ([9], rys. 4), oraz na lokomotywach Siemens S252 ([9], rys.5), wykazały, że istnieje możliwość pracy współczesnej lokomotywy w reżimie makropoślizgu [$s = 1-30\%$] w dłuższych przedziałach czasu. Powyższe skutkuje nierównomiernym, lokalnym nagrzewaniem kół do temperatury przemiany austenicznej [12], powodując powstawanie na powierzchniach toczonek kół warstewki martenzytu z licznymi pęknięciami i doprowadzając do jej wykruszania. Stwierdzono [12], że powyższy proces występuje na kołach lokomotyw EP09, charakteryzujących się spośród wszystkich eksploatowanych polskich lokomotyw najmniejszą trwałością obręczy.

Drugim czynnikiem narażającym koła na uszkodzenia w obrębie styku koła z osią są skokowe zmiany siły przyczepnej lokomotywy (rys. 6). Narażenia kół są wyjątkowo intensywne, gdy pojazd trakcyjny rozwija siły pociągowe występujące powyżej krzywej przyczepności, co skutkuje wysokim prawdopodobieństwem wystąpienia poślizgu (makropoślizgu) kół napędnych. Dlatego też w punkcie 4.2.8.2 decyzji Komisji UE z dnia 21 lutego 2008 r. dotyczącej specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu „Tabor” transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości (notyfikowana jako dokument nr C(2008) 648 (2008/232/WE)), określono wymagania dotyczące przyczepności koło/szyna (*Traction wheel/rail adhesion requirements*): „a) W celu zapewnienia wysokiej dostępności trakcji, konstrukcja pociągu oraz obliczenia charakterystyki trakcyjnej powinna uwzględniać stosowanie współczynników przyczepności o wartościach nie przekraczających podanych w Tabeli 1 (*To ensure a high availability of traction, the design of the train and the calculation of its traction performance shall not make use of wheel/rail adhesion exceeding the values given in Table*).

Tabela 1

Maksymalne dopuszczalne współczynniki przyczepności koło/szyna dla obliczeń trakcyjnych

Przy ruszaniu i bardzo małej prędkości (<i>At startup and very low speed</i>)	30%
Przy (<i>At</i>) 100 km/h	27,5%
Przy (<i>At</i>) 200 km/h	19%
Przy (<i>At</i>) 300 km/h	10%

Do obliczenia wartości pośrednich należy zastosować interpolację liniową.

3. Wpływ zmian napięcia oraz dopuszczalnego prądu obciążenia sieci trakcyjnej na parametry trakcyjne lokomotywy napędzanej silnikami asynchronicznymi

Na zelektryfikowanych liniach PLK sieć jezdną zasilana jest dwustronnie z kabiną sekcijną. W celu wykazania, w jakim stopniu rozwiązanie układu zasilania linii kolejowej wpływa na parametry trakcyjne analizowanych lokomotyw, przedstawiono wyniki przykładowych uproszczonych obliczeń prądów obciążenia i mocy rozwijanych przez silniki trakcyjne lokomotywy, limitowanych dopuszczalnymi spadkami napięcia DU w sieci trakcyjnej. Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

- spadek napięcia od podstacji trakcyjnej do odbieraka wyodrębnionej lokomotywy [13, 14] wyznaczono z równania:

$$\Delta U = U' + U'' \quad (10)$$

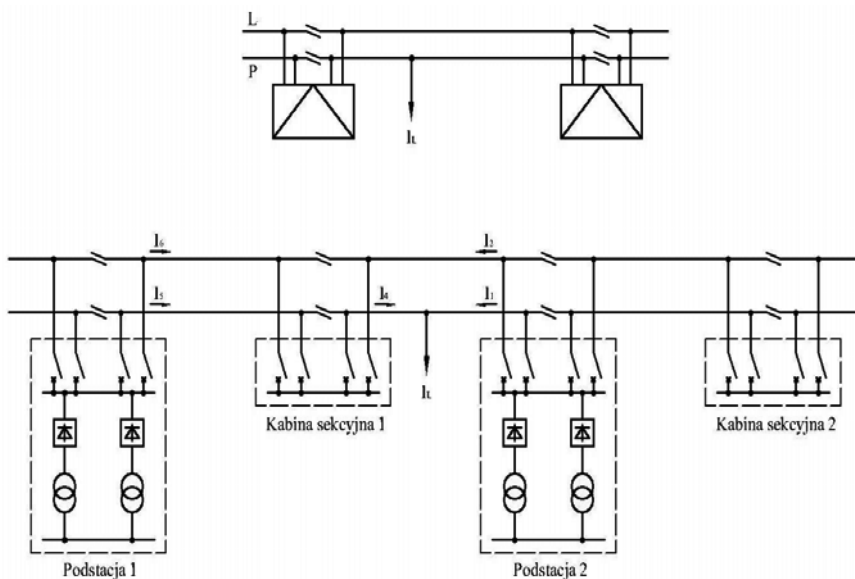
gdzie:

- U' – spadek napięcia wywołany poborem prądu przez analizowaną lokomotywę,
- U'' – spadek napięcia wywołany poborem prądu przez pozostałe pojazdy trakcyjne pracujące na analizowanym odcinku sieci pomiędzy podstacjami, czyli spadek napięcia od „tła”.
- napięcie znamionowe na szynach podstacji trakcyjnej prądu stałego jest równe napięciu znamionowemu $U_{sz} = 3300 \text{ V}$,
- spadek napięcia od „tła” wynosi: $U'' = 200 \text{ V}$,
- minimalna wartość napięcia „na pantografie” analizowanej lokomotywy zapewniająca pracę z mocą znamionową $U_{pmin} = 2800 \text{ V}$.

Obliczenia przeprowadzono dla sieci jezdnej typu KB95-2C o rezystancji sieci trakcyjnej jednego toru na linii 2-torowej z szynami S60 $r_s = 0,0843 \Omega/\text{km}$ [15], oraz sieci typu 2C120-2C $r_s = 0,056 \Omega/\text{km}$ [15].

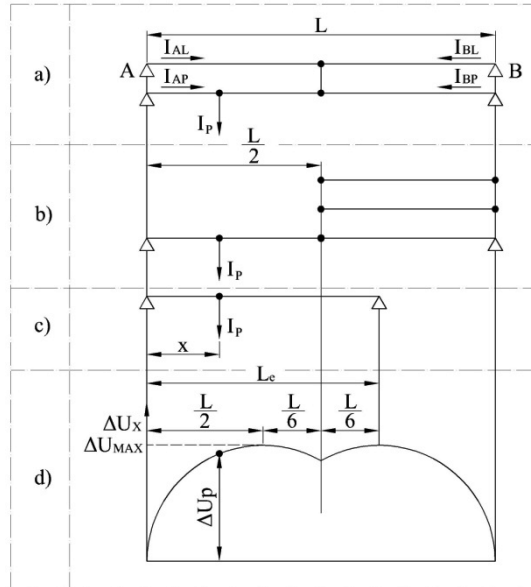
W analizowanym układzie zasilania maksymalny spadek napięcia U' występuje w odległości równej 1/3 odległości między podstacjami, a można go wyznaczyć z zależności:

$$U' = r_s * I_p * L * 1/6 \quad (11)$$



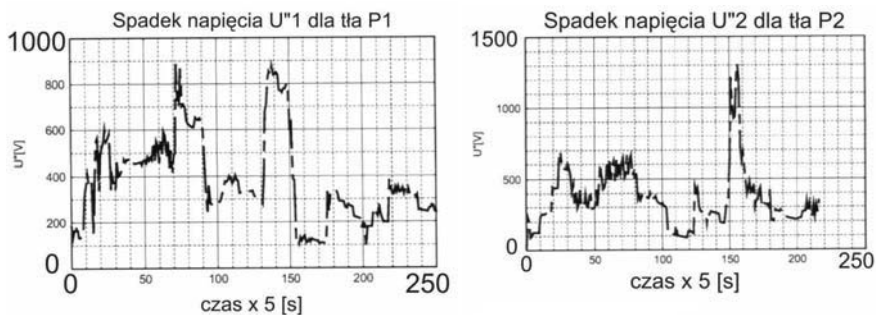
Rys. 8. Schemat układu zasilania sieci trakcyjnej – zasilanie dwustronne oraz dwustronne z kabiną sekcyjną

Fig. 8. Diagram of the traction power supply – for bilateral power supply system, and bilateral with sectional cab power supply system



Rys. 9. Spadek napięcia w sieci zasilanej dwustronnie z kabiną sekcijną w funkcji odległości lokomotywy od podstacji trakcyjnych: a) sieć obciążona prądem I_p ; b) przekształcenie sieci zasilania dwustronnego z kabiną sekcijną na dwustronne; c) odcinek ekwiwalentny sieci o długości L_e ; d) wykres spadku napięcia dla pojedynczego odbioru

Fig. 9. Voltage drop for bilateral, sectional cab power supply system as a function of locomotive from traction substation distance: a) I_p load current system; b) transformation of the power supply from the bilateral cab sectional to bilateral; c) equivalent network segment of L_e length; d) voltage drop characteristic for a single receiver



Rys. 10. Spadek napięcia $U''1$ dla tła pociągu P1 i $U''2$ dla tła pociągu P2 w funkcji czasu

Fig. 10. Voltage drop $U''1$ for train background P1 and $U''2$ for train background P2 as a function of time

Uwzględniając pobór mocy przez urządzenia pomocnicze na poziomie 150 kW oraz sprawność silników trakcyjnych i przekształtników 0,92, maksymalny prąd obciążenia sieci jezdnej typu KB95-2C, limitowany dopuszczalnymi spadkami napięć (11) wynosi 1070 A, co określa maksymalną moc lokomotywy przy napięciu 2800 V jako równą 2,6 MW.

Natomiast dla sieci jezdnej typu 2C120-2C prąd ten wzrasta do 1600 A, co określa maksymalną moc dla 2800 V jako równą 4 MW.

Literatura

- [1] Danzer J., *Elektrická trakce*, Plzen 2004.
- [2] Decyzja Komisji z dnia 21 lutego 2008 r. dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu „Tabor” transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości (notyfikowana jako dokument nr C(2008) 648) (2008/232/WE)).
- [3] Lang W., Roth R., *Optimale Kraftschlussausnutzung bei Hochleistungs-Schienenfahrzeugen*, Eisenbahntechnische Rundschau 42 (1993), 61-66.
- [4] Lewandowski M., *Regulacja wartości chwilowej momentu elektromagnetycznego silnika asynchronicznego w układzie napędowym pojazdu trakcyjnego przy stochastycznych zmianach współczynnika przyczepności*, Workshop – Nowoczesny tabor trakcyjny, Materiały Seminarium Naukowego Centrum Doskonałości EESEMC, Warszawa 25-27 XI 2003.
- [5] Lewandowski M., *Układ regulatora prędkości dla pojazdu trakcyjnego przy wykorzystaniu maksymalnego współczynnika przyczepności*, II Krajowe Sympozjum „Komputerowe systemy wspomagania prac w nauce, przemyśle i transporcie”, Politechnika Radomska, Zakopane 1998.
- [6] Lewandowski M., *Zakłócenia w układzie elektromechanicznym lokomotywy wywołane zmianami współczynnika przyczepności*, Konferencja Naukowa Uniwersytetu w Żilinie (Słowacja) „Nove smery v diagnostike a opravach elektrických strojov w zariadení”, 20-21 V 2002.
- [7] Lewis R., Olofsson U., *Mapping rail wear regimes and transitions*, Wear, Volume 257, Issues 7-8, October 2004, 721-729.
- [8] Polach O., *Optimierung moderner Lok-Drehgestelle durch fahrzeugdynamische Systemanalyse*, Eisenbahningenieur 53 (2002), 50-57.
- [9] Polach O., *Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit*, Wear, Volume 258, Issues 7-8, March 2005, 992-1000.
- [10] Rozenfeld W.E., Isajew I.P., Sidorow N.N., *Teoriia elektriczeskoj tiagi*, Transport, Moskwa 1983 (Розенфельд В.Е.: Теория электрической тяги).
- [11] Bendel H. (red.), *Elektrische Triebfahrzeuge*, Transpress VEB, Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1981.
- [12] Perchuc L., *Trwałość powierzchni tocznych kół kolejowych zestawów kołowych*, Praca doktorska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu Politechniki Śląskiej, promotor: M. Sitarz, Katowice 2000.
- [13] Szelaąg A., *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, rok 2002, z. 123, 3-180.

- [14] Buchta K., Szelał A., *Zastosowanie metod statystyczno-probabilistycznych do oceny napięcia w sieciach trakcyjnych 3 kV DC*, 7th International Conference „Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe”, MET 2005, Warszawa 2005, 304-310.
- [15] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelał A., *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.