

Obciążalność termiczna kolejowej sieci jezdnej

Zbigniew Hilary Żurek, Piotr Duka


Wprowadzenie

Obciążalność prądowa sieci jezdnej to prąd, jaki możemy pobierać z sieci trakcyjnej w określonych warunkach geograficznych (klimatycznych – średnia temperatura otoczenia i nasłonecznienie) przy zdefiniowanych warunkach wymiany ciepła z otoczeniem (konwekcja i promieniowanie), w granicach limitowanych temperaturą dopuszczalną drutu jezdnej. Zakres temperatury obciążenia ciągłego czy krótkotrwałego wynika z dopuszczalnych parametrów mechanicznych (głównie drutu jezdnej i jego składu stopowego). Obciążalność prądowa (termiczna) wyznaczana jest dla konkretnej konstrukcji sieci jezdnej, przekroju lin nośnych i drutów jezdnych, konstrukcji sieci, przewodności elektrycznej drutu jednego oraz sposobu zasilania (*Zweiseitige Speisung*, *Zweiseitige Speisung mit Querkupplung*). Z punktu widzenia strat mocy, głównymi składowymi dla wyznaczania przyrostu temperatury są prąd, czas, pojemność cieplna, przewodzenie ciepła, konwekcja i promieniowanie przy krytycznej prędkości wiatru i temperatury otoczenia oraz przekroju i powierzchni drutu. Moc promieniowania słonecznego jest istotnym składnikiem przyrostu temperatury. Wzajemne zależności są dla inżyniera intuicyjnie oczywiste. Dla potrzeb konstruktorskich, a także dydaktycznych użyteczny okazał się model opracowany na Politechnice Śląskiej [2, 5] już w latach osiemdziesiątych XX w., a obecnie w programie MATHEMATICA. Program uwzględnia wpływ różnych składowych odbioru prądu (sposób zasilania) z sieci na temperaturę wybranego punktu krytycznego sieci podczas przejazdu lokomotywy na odcinku zasilania. Uproszczony model matematyczny oraz wizualizację zmian temperatury przedstawiono w opracowaniu. Zadaniem modelu jest głównie obrazowanie jakościowe wpływu składowych odbioru prądu, ponieważ przedstawia on kilka sposobów rozwiązania zasilania sieci i jej wzmocnienia prądowego. Obliczenia ilościowe wymagają wprowadzenia rzeczywistych eksploatacyjnych warunków odbioru prądu, co nie stanowi trudności.

Obciążalność termiczna i prądowa

Obciążalność prądowa wynika z dopuszczalnego przyrostu temperatury drutu jezdnej do temperatury eksploatacyjnej [3, 4]. Druty jezdne produkowane są najczęściej o przekrojach znormalizowanych kształtem, jak i wymiarem – 100 lub 150 mm². Przewody jezdne (Djp lub DjpS EN-50149) mają bardzo zbliżone parametry mechaniczne i elektryczne przy istotnych zmianach temperatury eksploatacyjnej na korzyść drutu z dodatkiem srebra [3, 4]. Rozpatrywana temperatura przewodu jezdnej jest sumą temperatury początkowej środowiska, przyrostu temperatury od poboru prądu, energii słonecznej i nagrzewania od styku dynamicznego w dokładnie sprecyzowanych warunkach konwekcji i promieniowania (utlenienie

Streszczenie: Obciążalność prądowa systemu styków kolejowych jest równa prądowi, który może być pobierany z sieci bez przekraczania dopuszczalnych parametrów systemu. Dopuszczalna wartość prądu wynika z temperatury otoczenia, mocy promieniowanej przez Słońce, warunków wymiany ciepła oraz czasu poboru prądu (prędkość jazdy). Parametry mechaniczne układu poboru prądu, w tym przewód jezdny, limitują wartość prądu pobieranego. Określona obciążalność prądowa (w efekcie cieplna) obowiązuje dla danej konstrukcji układu zasilania sieci jezdnej. Wśród głównych zmiennych wpływających na straty mocy można wymienić prąd, czas, pojemność cieplną, przewodnictwo cieplne, konwekcję i promieniowanie. Zwykle zakłada się niesprzyjające warunki (prędkość wiatru, temperatura otoczenia i moc promieniowana przez Słońce). W artykule przedstawiono model dynamicznego obciążenia termicznego sieci trakcyjnej. Model ten umożliwi monitorowanie – wspólnie lub osobno – różnych czynników wpływających na zmiany temperatury. Celem modelu jest jakościowe obrazowanie obciążenia cieplnego dla różnych systemów zasilania i sposobu rozdziału prądu. Obliczenia ilościowe obciążenia sieci są również możliwe po uwzględnieniu rzeczywistych warunków przejazdu.

 **Abstract:** *The current capacity of the rail contact system is equal to the current that can be taken from the network without exceeding the permissible system parameters. The permissible current value is determined by the ambient temperature, the power emitted by the sun, the heat transfer conditions and the value/time of the input current (operating speed). The mechanical parameters of the power system, including the lead wire, limit current consumption. The indicated current carrying capacity (actually thermal) is valid for this OCL power system design. The main variables that affect power loss include current, time, heat capacity, thermal conductivity, convection, and radiation. Adverse conditions (wind speed, ambient temperature, and power radiated by the sun) are usually assumed. This article presents a model of the dynamic thermal load of an air contact line that allows you to track – together or separately – various factors affecting temperature changes. The aim of the model is a qualitative display of the heat load for various power supply systems and current distribution methods. Quantitative calculations of network load are also possible after taking into account the actual conditions of the trip.*

powierzchni) oraz przewodzenia cieplnego w środowisku, gdzie prędkość wiatru może spadać do 0,6 m/s (pogoda bezwietrzna). Statystyki dotyczące udziału mocy emitowanej przez Słońce na

powierzchnię 1 m² przekraczają nawet moc 1 kW (w górnych warstwach atmosfery). W odniesieniu do poziomu drogi jezdnej może stanowić to przedział 10–30% mocy emisji Słońca. Temperaturę drutu jezdneho wyznaczamy z prędkości przejazdu pociągu, czyli czasu oddziaływania określonej wartości prądu lub jego charakterystyki czasowo-prądowej i z podstawowej zależności:

$$\Delta\vartheta = P \cdot S_Z \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta\vartheta$ – przyrost temperatury;

P – moc elektryczna wydzielona na rezystancji przewodu;

S_Z – rezystancja termiczna;

T – stała czasowa;

t – czas wydzielania mocy P .

Rezystancję termiczną decydującą o poziomie przyrostu temperatury wyliczamy ze wzoru:

$$S_Z = \frac{1}{(\alpha_\varepsilon + \alpha_K) \cdot F} \quad (2)$$

gdzie: współczynnik rozpraszania ciepła wskutek promieniowania obliczany jest z zależności, [2]:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{5,7 \cdot \varepsilon \left(\left(\frac{V+273}{100} \right)^4 + \left(\frac{V_0+273}{100} \right)^4 \right)}{\vartheta - \vartheta_0} \quad (3)$$

natomiast współczynnik rozpraszania ciepła dzięki konwekcji swobodnej obliczany jest z równania [2]:

$$\alpha_K = A' \cdot \left(\frac{\vartheta - \vartheta_0}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

gdzie:

D – wymiar charakterystyczny (średnia przewodu) 1,2 cm;

ε – współczynnik emisyjności (0,5 + 0,9) [1, 7];

A' – współczynnik dla przewodu płaskiego rozwieszono (o przekroju okrągłym) [2]

$$A' = A \frac{0,47}{0,54} \quad (5)$$

$$A = F \frac{(\vartheta + \vartheta_0)}{2} \quad (6)$$

F – powierzchnia boczna przewodu;

ϑ_0 – temperatura otoczenia;

ϑ – temperatura przewodu.

reklama

reklama

Zależności (3–6) mogą być stosowane dla prędkości wiatru równej 0 m/s oraz dla przewodu o przekroju okrągłym.

Opory cieplne wyznaczone doświadczalnie przez Petera Schmidta są wiarygodnym uproszczeniem analizy [6, 7]. Proponuje on przyjmować do obliczeń rezystancję termiczną zastępczą, uśrednioną dla całego zakresu temperatur, uzyskaną w oparciu o przeprowadzone badania poligonowe i laboratoryjne przewodu DjP100. Postać empirycznego wzoru dla prędkości wiatru 0 m/s jest następująca:

$$s_{1z} = \frac{1}{\alpha_{1z} \cdot F} \quad (7)$$

gdzie:

$\alpha_{1z} - 13 [Wm^{-2}K^{-1}]$;

$F - [m^2]$;

$S_{1z} - [K/W]$.

W warunkach rzeczywistych prędkość wiatru jest większa od 0 m/s. Prędkość minimalną wiatru ustalono w zakresie od 0,6 do 1,0 m/s (zależnie od kolejowych zarządów europejskich).

Dla prędkości wiatru m/s zgodnie z zaleceniami zawartymi w pracach [6, 7] rezystancja termiczna zastępcza opisana jest kolejnym wzorem:

$$s_{2z} = \frac{1}{\alpha_{2z} \cdot F} \quad (8)$$

gdzie:

$$\alpha_{2z} = (21 + 9 \cdot V_w), [Wm^{-2}K^{-1}] \quad (9)$$

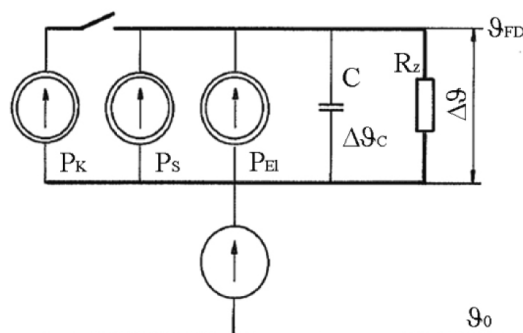
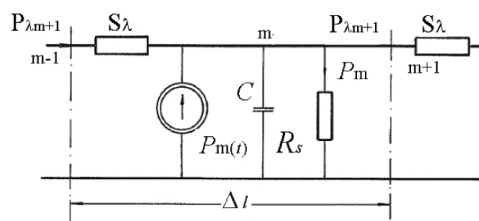
Prędkość przejazdu jest przeliczana na czas poboru prądu na założonym wycinku sieci podczas przejazdu. Duża prędkość (już powyżej 100 km/h) pomimo wzrostu mocy i prądu nie wpływa znacząco na temperaturę sieci, co zostanie przedstawione na wykresach (manipulatory). Utrudnieniem mogą być sieci w systemie zasilania 3 kV.

Model termiczny uproszczony

Temperatura końcowa $\Delta\vartheta_{FD}$ jest [8] sumą temperatury otoczenia ϑ_0 i przyrostów temperatury od mocy wydzielonej na odcinku drutu od przepływającego prądu P_{EL} , mocy przejętej od promieniowania słonecznego P_s i mocy wydzielonej w punkcie kontaktu drutów jezdnych sieci P_K z uwzględnieniem warunków wymiany ciepła od konwekcji i promieniowania oraz przewodności cieplnej (rys. 1).

Rozpatrywany drut jezdny jest równocześnie chłodzony, dlatego temperatura przewodu (1) uwzględnia jego chłodzenie zgodnie z zależnością:

$$\Delta\vartheta_n = \sum_{m=1}^n (P + P_s)_m \cdot S_z \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}) + \Delta\vartheta_{n-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T}} + (\Delta\vartheta_k + \Delta\vartheta_p) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad (10)$$



Rys. 1. Sposób wyznaczania temperatury na modelowym odcinku drutu jezdnego

Końcowy poziom temperatury uwzględnia temperaturę otoczenia ϑ_0

$$\vartheta = \Delta\vartheta_n + \Delta\vartheta_0 \quad (11)$$

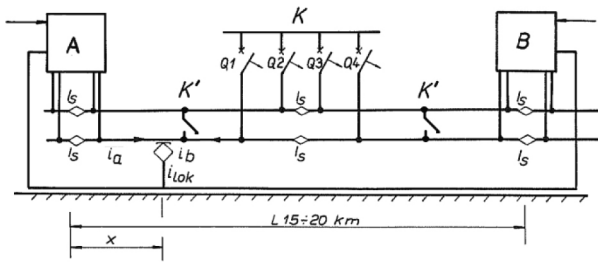
Moc Słońca nawet w warunkach Europy Środkowej nie jest bez znaczenia, podobnie prędkość wiatru. W warunkach oceny obciążalności termicznej liczymy się z warunkami skrajnymi co do wartości temperatury otoczenia, mocy promieniowania słonecznego, jak i możliwości braku ruchu powietrza (prędkość wiatru od 0 do 0,6 m/s).

Modele zasilania

Na wartość ciepła wydzielonego podczas przepływu prądu ma wpływ konstrukcja sieci jezdnej linii jedno- lub dwutorowej oraz sposoby jej wzmocnienia [2]. Najwyższe przyrosty temperatur występują na odcinku zasilania linii jednotorowej. Udział kabiny sekcyjnej K , łączącej w środku dwie sieci jezdne linii dwutorowej, zmniejsza obciążenie prądowe i spadki napięcia sieci. Wprowadzenie dodatkowych połączeń (rys. 2) poprzecznych K' pomiędzy kabiną sekcyjną a podstacjami sąsiednimi (A, B) daje kolejną możliwość pomniejszenia spadków napięć, a tym samym umożliwia większy pobór drutu jezdnej sieci jezdnej.

Kabina sekcyjna K i dalsze połączenia poprzeczne K' zmniejszają spadki napięć sieci i przemieszczają punkty zrównania wartości prądów płynących do lokomotywy od sąsiednich kabin sekcyjnych (A, B). Na wykresie (rys. 3) przedstawiono wyniki dla obliczeń uproszczonych udziału prądów od podstacji A i B oraz punkty zrównania wartości prądów dla sieci jednotorowej dwutorowej (z kabiną sekcyjną), a także po wprowadzeniu dwóch dodatkowych połączeń poprzecznych K .

Działania zmierzające w kierunku pomniejszenia spadków napięć są istotne dla sieci trakcyjnej zasilanej napięciem 3 kV przy wzroście mocy lokomotyw czy składów pociągowych

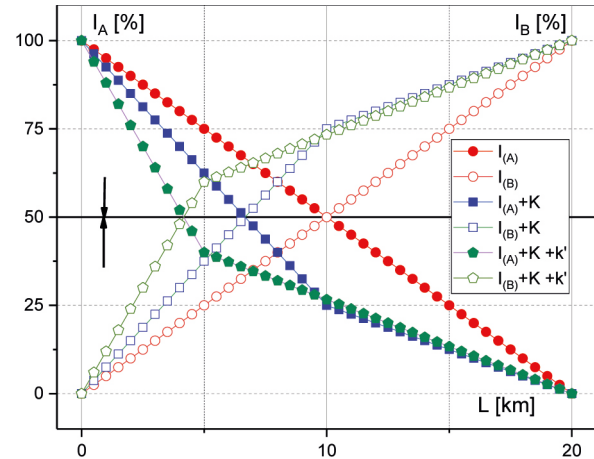


Rys. 2. Schemat połączeń i zasilania sieci jezdnej linii dwutorowej

związanym z przyrostem prędkości. Oprócz połączeń poprzecznych wielokrotnie analizowano połączenia wzdłużne na długości $l/2$ lub $l/4$ odcinka naprężenia [2]. Połączenia wzdłużne wynikające z konstrukcji przęsła naprężenia nie zapewniają proporcjonalnego rozdziału prądu w stosunku do przekroju linii nośnej i drutu jezdnej. W miarę wprowadzania dodatkowych połączeń wzdłużnych proporcja wartości od wartości 1,3 dąży do 1,05 (zbliżonej do proporcjonalnej) [2].

Rysunek 3 przedstawia punkty zrównania rozplywu prądu dla trzech wersji zasilania.

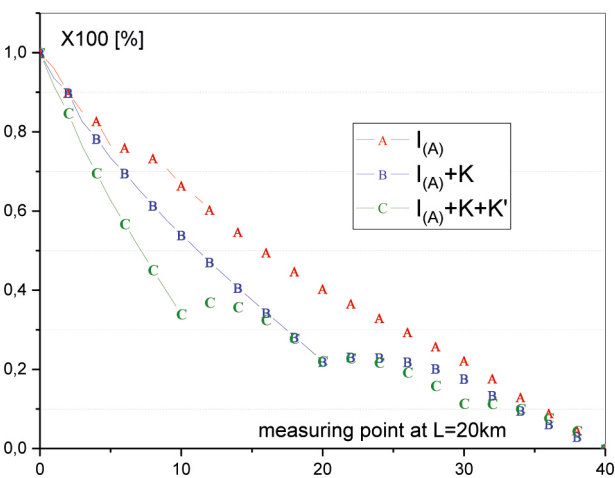
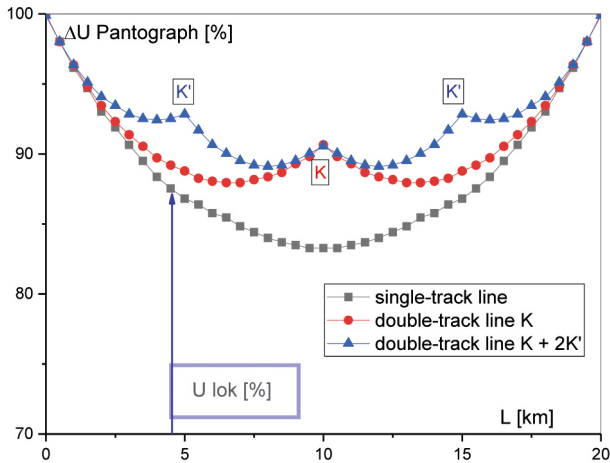
Spadki napięć pokazane na rysunku 4 wyznaczono na modelu fizycznym z zachowaniem proporcji parametrów elektrycznych.



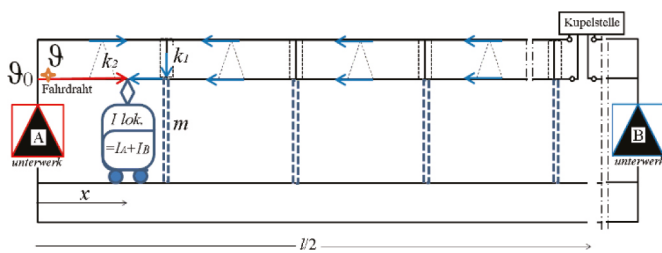
Rys. 3. Teoretyczne udziały prądów z kierunków podstacji A i B, pomiarzone udziały prądów z uwzględnieniem spadków napięć sieci

Prąd płynący z podstacji trakcyjnej A nie jest równoważny wartości prądu dopływającego do odbieraka prądu (rys. 5) ze strony podstacji A.

Błąd uproszczenia zależy od założonej odległości połączeń elektrycznych wzdłużnych. Założono dla tej odległości



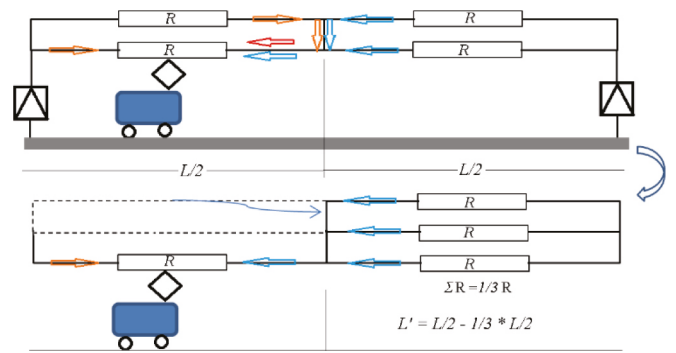
Rys. 4. Spadki napięcia na odbieraku prądu z sieci i rzeczywiste zmiany prądów dopływających do odbieraka podczas przejazdu



Rys. 5. Model chwilowego rozptywu prądu w drucie jezdnym z uwzględnieniem parametrów oporu sieci drugiego toru

konstrukcyjną pręśnią naprężenia na linii prostej. Ta odległość dla większych prędkości przejazdu jest istotna z punktu widzenia mocy cieplnej wydzielonej w przewodzie jezdym podczas przejazdu. Dla obliczeń cieplnych modelowych zastosowano uproszczenie z rysunku 6.

Pomiary wykonane na modelu fizycznym obrazują korzyści wynikające z wprowadzenia połączeń poprzecznych. Wskazują na istotność rozwiązania wobec perspektywy zwiększania przekroju sieci jezdnej dla dużych prędkości, szczególnie



Rys. 6. Rzeczywiste i uproszczone wyznaczenie rozptywów prądu

przy systemie 3 kV. Każde dodatkowe połączenie poprzeczne, a także i wzdłużne zmniejsza spadki napięć i chwilowe udziały prądów. Połączenia wzdłużne na sieci jezdnej tworzą połączenia prądowe pomiędzy odcinkami naprężenia. Połączenie mechaniczne kotwienia środkowego nie jest projektowym połączeniem prądowym. Na linii dwutorowej wprowadzono kabinę sekcijną w połowie odległości. Dodatkowych połączeń prądowych poprzecznych w obliczeniach temperatury nie uwzględniano. Prąd dopływający do odbieraka prądu przed i za lokomotywą jest równy liczbowo prądom z podstacji B oraz A jedynie w punkcie zrównania rezystancji sieci.

Metodyka obliczeń i prezentacji

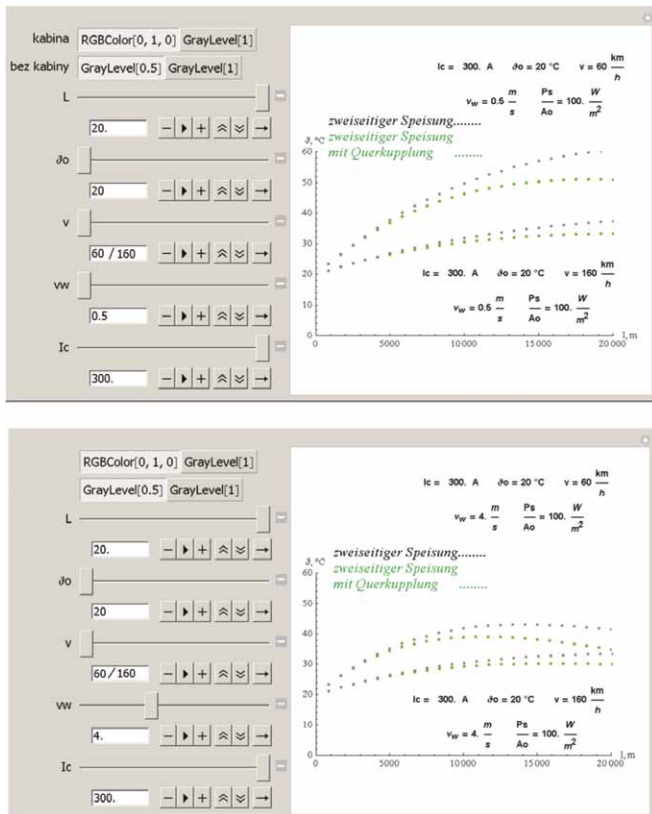
Do obliczeń obciążeń termicznych [1, 2, 5] wprowadzono kilka upraszczających założeń. Założenia dotyczą rozptywu prądu. Zakłada się powszechnie rozkład proporcjonalny prądu do stosunku przekrojów drutów jezdnych i lin nośnych. Użytkownik programu ma możliwość zmiany podstawowych parametrów zgodnie z makietami (manipulatorami) pokazanymi na rysunku 7. Możliwa jest analiza dynamiczna zmian wybranych parametrów modelowych na drodze przejazdu i w czasie przejazdu dla dowolnej konfiguracji sieci i zasilania.

Na obrazach przedstawiających manipulatory przejazdu (rys. 7) założono długość $L = 20$ km pomiędzy podstacjami. Temperaturę otoczenia 20°C . Prędkość wiatru ustalono na krytyczną z przedziału $0,5/4 \text{ m}^{\text{s}^{-1}}$ oraz całkowity prąd dopływający do lokomotywy dla sieci jednotorowej i dwutorowej z kabiną sekcijną. Analizowano prędkości przejazdu 60 km/h i 160 km/h.

Podsumowanie

Projektowanie sieci trakcyjnej jest podstawowym zagadnieniem projektantów sieci kolejowej. Dla celów dydaktyki na uczelniach wyższych i w szkołach zawodowych prezentacje wzajemnych lub niezależnych czynników oddziałujących na temperaturę sieci i sposób przedstawiania jest znacznym ułatwieniem procesu nauczania. Także projektantom analizującym ruch podmiejski może ułatwić badanie warunków utrzymania temperatury eksploatacyjnej dla różnych czasów następstwa pociągów.

Przedstawione opracowanie i program umożliwią analizowanie zmian przekroju drutu jezdnej, lin nośnych, konstrukcji



Rys. 7. Klatka dynamicznego manipulatora przejazdu dla porównywalnych parametrów prędkości przejazdu pociągu i prędkości wiatru

sieci wzmocnień poprzecznych i podłużnych. Przy pomocy oprogramowania szacować można w „chwili” skuteczność metod utrzymania optymalnej obciążalności prądowej i termicznej sieci bez potrzeby zwiększania jej przekroju i masy. Jest to szczególnie istotne dla zarządów kolejowych w krajach, w których utrzymywany jest niskonapięciowy system zasilania do 3 kV. W materiałach wykorzystano archiwalne

materiały badań z lat współpracy Politechniki Śląskiej z Uczelnią Wyższą Transportu w Dreźnie.

Literatura

- [1] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *Obciążalność prądowa sieci trakcyjnej 3 kV wczoraj i dziś w świetle zwiększania prędkości*. RG 2016, <https://www.researchgate.net/publication/299510377>.
- [2] ŻUREK Z.H.: *Analiza obciążalności prądowej sieci trakcyjnej*. Zeszyty Naukowe Elektryka, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, 1988, DOI: 10.13140/RG.2.1.2739.6640, <https://www.researchgate.net/publication/274884009>.
- [3] KORGER M., RUCH M.: *Zulässige Oberstrom Grenzwerte im elektrifizierten Streckennetz der DB*, DB Energie GmbH, Frankfurt am Mai 2014.
- [4] HAYOZ P., WILI U., ROGLER R.-D., KITZROW G., PUPKE F.: *Fahrdrahtschaden in Strecken-Trennungen-Härte und Zugfestigkeit*. „Fahrleitungsanlage” 112/2014, Heft 4.
- [5] ŻUREK Z.H.: *Prądowy współczynnik nagrzewania przy konwekcji wymuszonej na przykładzie przewodu jezdniowego Djp 100*. Prace Instytutu Elektrotechniki, 1990, R. 38 z. 158.
- [6] SCHMIDT P.: *Erwärmung und thermische Belastbarkeit von Fahrleitungen elektrischer Bahnen*. Wissenschaftler Zeitschrift. D. Hochschule Für Verkehrswesen „Friedrich List” in Dresden 27 (1980) H.T.
- [7] SCHMIDT P., HOFMANN G.: *Methode zum bemessen von Bahnenergieversorgungsanlagen*. Hochschule für Verkehrswesen, Dresden, eingegangen am 15 April 1986.
- [8] BARTODZIEJ G.: *Modele elektrycznych złączy stykowych*. Zeszyty Naukowe Elektryka, nr 721, Gliwice 1982.

Zbigniew Hilary Żurek, Piotr Duka
Politechnika Śląska

artykuł recenzowany