

Tadeusz Maciołek

Wybrane zagadnienia projektowe trakcyjnych sieci tramwajowych

W artykule przedstawione zostały zagadnienia związane z modernizacją i budową nowych sieci tramwajowych. Nowe materiały i podzespoły konstrukcyjne pozwalają na poprawę funkcjonowania sieci. Opisane zostały parametry wymiarowe i obciążeniowe podstawowej struktury sieci. Przedstawiono również nowe rozwiązania dotyczące konstrukcji urządzeń naprzężających.

Wprowadzenie

Trakcyjne linie tramwajowe w Polsce w ostatnich latach są rozbudowywane i poddawane modernizacji. W odróżnieniu od sieci linii kolejowych 3 kV, nie tworzą one połączonego systemu w całej Polsce [8, 10, 12]. Nie mają więc ściśle narzuconych rozwiązań dotyczących rozwiązań konstrukcji. W efekcie trakcyjne sieci tramwajowe są bardziej zróżnicowane niż sieci kolejowe. Łatwiejsze też jest wprowadzanie nowych rozwiązań. Obecnie sieci trakcyjne zasilane są napięciem systemowym

stałym 600 V. Nawet dla nowego systemu tramwajowego wybudowanego w Olsztynie zostało utrzymane to napięcie, mimo że ze względów eksploatacyjnych celowe byłoby podniesienie wartości napięcia systemowego. Mimo że teoretycznie nowoczesny tabor ma napęd energooszczędny w stosunku do napędów z rozruchem oporowym to w rzeczywistości pobiera on większe ilości energii niż starszy tabor. Wynika to z osiągnięcia wyższych przyspieszeń, prędkości i wymaganej poprawy komfortu pasażerów. Nowe sieci trakcyjne powinny uwzględnić wzrost tych wymagań. Projektanci powinni uwzględnić dotychczas stosowane rozwiązania ze względu na możliwości technologiczne, doświadczenia i istniejący system prowadzenia obsługi, konserwacji i napraw sieci. Powinny zostać uwzględnione uwarunkowania działań bieżących.

Struktura sieci

W trakcyjnych sieciach tramwajowych aktualnie stosuje się sieci płaskie, łańcuchowe, półskompensowane i skompensowane wykonane z miedzi. Ze względu na wymagane prędkości jazdy do 70 km/h wystarczające są konstrukcje sieci półskompensowanych. Na odcinkach naziemnych należy stosować sieć łańcuchową skompensowaną lub półskompensowaną. Sieć trakcyjna w pełni skompensowana, nawet przy małych naciągach, może być stosowana do prędkości 110 km/h. Sieć półskompensowana może być stosowana do prędkości maksymalnej 90 km/h pod warunkiem zapewnienia właściwej regulacji [1, 3, 2].

Sieć trakcyjna na odcinkach o niskiej prędkości jazdy na łukach o promieniach poniżej 80 m, pętlach i torach odstawczych może stanowić sieć płaską. Sieć płaską stosuje się również w obszarach gdzie wymagana jest mała wysokość konstrukcyjna sieci. Stosowanie sieci bez kompensacji zalecane jest na odcinkach o prędkości maksymalnej do 30 km/h. Również w obszarach skrzyżowań torów prowadzenie sieci łańcuchowej jest utrudnione, a w tych miejscach prędkość jest ograniczona. W tunelu można stosować sieć płaską kompensowaną za pomocą urządzeń naprzężających: za pomocą ciężarów lub sprężyn. Stosowanie sieci płaskiej z regulacją sezonową powoduje wzrost ilości prac konserwacyjnych i powinno być ograniczane do niezbędnego minimum. Sieć łańcuchowa z liną nośną miedzianą zapewnia zwiększenie przewodności całej sieci. Na odcinkach o niskich prędkościach i wymuszonym gęstym podwieszeniu korzystniejsze może być zastosowanie sieci płaskiej dwuprzewodowej. Na odcinkach o dużym natężeniu ruchu i dużej prędkości celowe może być zastosowanie sieci łańcuchowej dwuprzewodowej. Jest to sieć najkorzystniejsza ze względu na największą prędkość eksploatacyjną oraz dużą obciążalność prądową. Jednocześnie sieć tą cechuje największa trwałość eksploatacyjna.

Na odcinkach o obniżonej wysokości, w zajezdniach i tunelach korzystne może być stosowanie sieci szynowej sztywnej Al/Cu. Sieć sztywną można stosować według zaleceń producenta, po uzyskaniu przez nią dopuszczenia do stosowania w Unii Europejskiej na liniach kolejowych lub tramwajowych. Sieć sztyw-



Rys. 1. Sieć płaska dwuprzewodowa z zawieszeniem poprzecznym



Rys. 2. Sieć łańcuchowa

na aluminiowo-miedziana ma ograniczoną trwałość i wymaga okresowej wymiany przewodu jezdnego będącego częścią składową sieci.

Długości pręseł przelotowych

Rozpiętości pręseł nie powinny przekraczać:

- ❖ 10 m – w tunelu dla sieci płaskiej z regulacją sezonową,
- ❖ 25 m – w tunelu dla sieci płaskiej z naciągami z ciężarami lub sprężynami kompensacyjnymi,
- ❖ 30 m – na powierzchni ziemi dla sieci płaskiej z regulacją sezonową, dla pojedynczych pręseł do 35 m,
- ❖ 35 m – na powierzchni ziemi dla sieci wielokrotnej (łańcuchowej) z regulacją sezonową,
- ❖ 60 m – na powierzchni ziemi dla sieci wielokrotnej (łańcuchowej) półskompensowanej,
- ❖ 60 m – na powierzchni ziemi dla sieci wielokrotnej (łańcuchowej) skompensowanej, dla pojedynczych pręseł do 65 m.

Temperatury i obciążenia do obliczeń sieci

Dla potrzeb projektowania przyjmuje się następujące wartości:

- ◆ temperatura minimalna (mrozu) -25°C ,
- ◆ temperatura sadzi -5°C ,
- ◆ temperatura normalna $+10^{\circ}\text{C}$,
- ◆ temperatura przy wietrze $+15^{\circ}\text{C}$,
- ◆ temperatura maksymalna (upału) $+40^{\circ}\text{C}$.

Temperatura sieci $+40^{\circ}\text{C}$ jest często przekraczana latem przy dużym natężeniu ruchu. Jeżeli dotyczy to krótkiego odcinka sekcji naprężenia nie stanowi to wtedy problemu eksploatacyjnego. Jeżeli sieć trakcyjna ze względu na układ zasilania jest przeciążana na dłuższym odcinku to należy przy doborze urządzeń naprężających uwzględnić jako temperaturę maksymalną przewodów $+80^{\circ}\text{C}$ [11, 10]. Jako obciążenia mechaniczne należy uwzględnić następujące obciążenia trwałe:

- ❖ ciężar przewodów i osprzętu sieci jezdnej,
- ❖ naciąg przewodów, i obciążenia doraźne:
 - ◆ ciężar sadzi,
 - ◆ parcie wiatru,
 - ◆ nacisk odbieraków prądu,
 - ◆ obciążenia w trakcie montażu sieci.

Urządzenia naprężające

Przewody sieci na końcu odcinka naprężenia zmieniają swoje położenie ΔL zgodnie z zakresem zmian temperatury ΔT i długości półsekcji naprężenia. W przekładniach naprężających wielorolkowych stanowi to odległość między osiami rolek. W związku ze zmianami długości sieci następuje zmiana położenia ciężarów. Zakres przesunięcia ciężarów jest większy o krotność przełożenia:

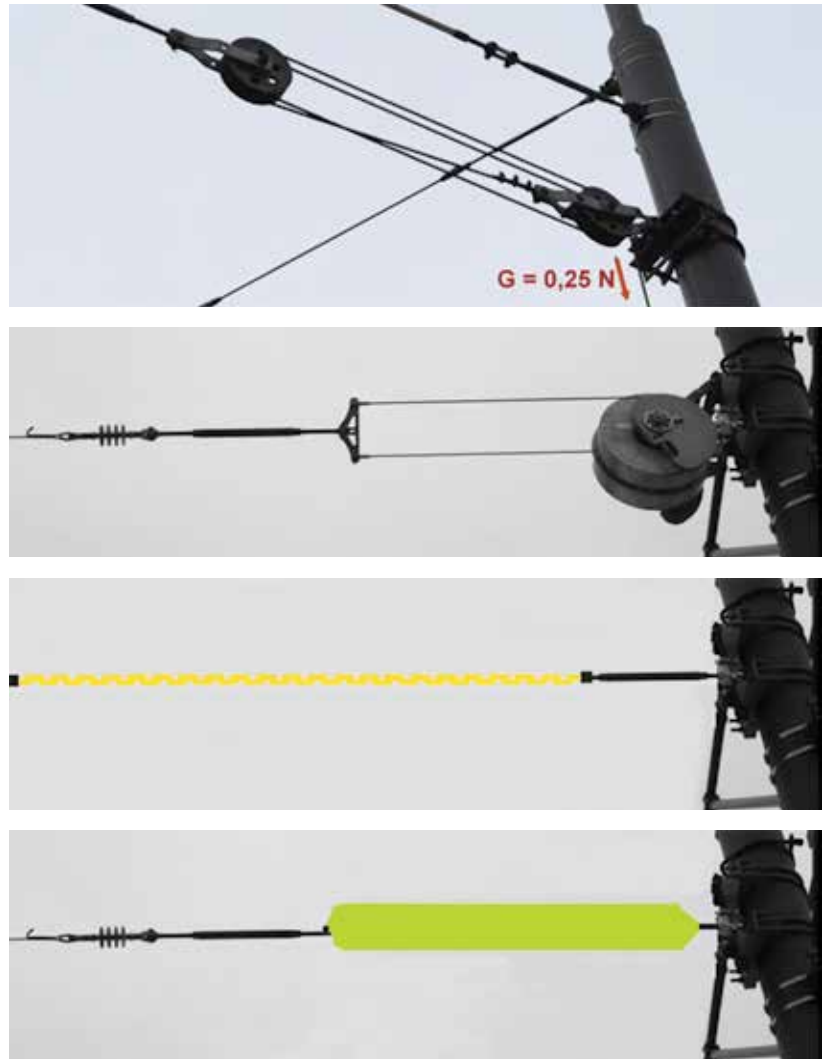
$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

α – współczynnik wydłużalności cieplnej miedzi i odmian niskostopowych.

Podstawowo stosowane konstrukcje urządzeń naprężających to:

- a) rolkowe z szeregowym układem rolek o przełożeniu 1:2 lub 1:4,
- b) przekładnie kołowe o współosiowym zamontowaniu rolki naprężającej przewód trakcyjny i rolki połączonej z liną ciężarów naprężających,
- c) sprężynowe.



Rys. 3. Rozwiązania urządzeń naprężających: a) z rolkami równoległymi o przełożeniu 1:4, b) sprężynowe ze sprężyną spiralną, c) sprężynowe ze sprężyną wstęgową (faza prototypowa) d) pneumatyczne (faza prototypowa)

Niezalecane, ale dopuszczalne jest stosowanie rolkowego urządzenia z równoległym układem rolek o przełożeniu 1:4. Wynika to ze skali dotychczasowego ich stosowania.

Urządzenia naprężające z takim układem rolek w nowo budowanych i modernizowanych trakcyjnych sieciach kolejowych nie są stosowane od wielu lat. Wadą tego rozwiązania są wyższe opory ruchu niż w innych rozwiązaniach. Lina naprężająca ulega szybszemu zużyciu ze względu na jej skośne prowadzenie [4, 10]. Wprowadzane sprężynowe urządzenia naprężające cechuje kompaktowość konstrukcji. Ich charakterystyka siły nie jest wartością stałą i zależna jest jednak od właściwości sprężyny. Poszczególne egzemplarze cechują drobne różnice w sile naprężania. Konstrukcja wykonywana jest na określonej sile bez możliwości jej zmiany. Najnowsze rozwiązania urządzeń naprężających: sprężynowego wstęgowego i pneumatycznego są najlżejsze ze wszystkich konstrukcji. Przykładowo dla siły naciągu $N = 8 \text{ kN}$ masa kompletnego urządzenia naprężającego wynosi:

- ❖ z przekładnią rolkową 1:4 – ok. 250 kg,
- ❖ sprężynowego spiralnego – ok. 120 kg,
- ❖ sprężynowego wstęgowego – ok. 100 kg,
- ❖ pneumatycznego – ok. 50 kg.

W Zakładzie Trakcji Politechniki Warszawskiej obecnie opracowywane są prototypy nowych urządzeń naprężających: sprężynowego wstęgowego oraz pneumatycznego. Urządzenie sprężynowe wstęgowe wykonane z tworzyw sztucznych pozwala na eliminację izolatora kotwowego.

Urządzenia naprężające powinny spełniać następujące wymagania:

- ♦ powinny zapewnić możliwość montażu i regulacji urządzeń naprężających w zależności od aktualnej temperatury otoczenia,
- ♦ zapewnić stałość siły naciągu w pełnym zakresie ruchu,
- ♦ wprowadzać minimalne opory ruchu.

Sekcja naprężenia obustronnie naprężana musi być wyposażona w kotwienie środkowe sieci jezdnej. Sposób rozwiązania kotwienia środkowego powinien spełniać wymagania:

- a) uniemożliwienie przesuwania się sieci wzdłuż toru,
- b) symetryczne obciążenie mechaniczne konstrukcji wsporczej środkowej kotwienia środkowego,
- c) ograniczenie skutków awarii do połowy odcinka naprężenia w przypadku zerwania liny nośnej lub przewodu jezdnej.

Przy zastosowaniu kotwienia środkowego na indywidualnych konstrukcjach wsporczych należy dążyć do wyrównania rozpiętości pomiędzy słupem środkowym a słupami kotwienia środkowego. Kotwienia przewodów, naprężanych przy pomocy ciężarów, powinny zapewniać swobodny ruch ciężarów dla obliczeniowego zakresu zmienności temperatury (od -25°C do $+40^{\circ}\text{C}$ lub $+80^{\circ}\text{C}$). W sieci półskompensowanej należy stosować odprężniki do przewodów i liny nośnej. W temperaturze upału najniższy punkt liny kotwienia środkowego powinien znajdować się co najmniej 300 mm powyżej poziomu przewodu jezdnej.

Zawieszenie przewodów jezdnych

Wysokość zawieszenia przewodu jezdnej nominalna w punktach jego zamocowania, mierzona od poziomu główki szyny jezdnej powinna wynosić w sieciach naziemnych 5,5 m. Odchyłki dopuszczalne wynoszą $+0,1$ m i $-0,25$ m.

Obniżenie wysokości zawieszenia przewodów jezdnych

Zmniejszenie wysokości zawieszenia przewodów jezdnych w liniach naziemnych dopuszcza się do 4,5 m w przypadku prowadzenia przewodu pod mostami, wiaduktami, w tunelach drogowych, w bramach zajezdni itp. przy torowisku wydzielonym i minimum 5 m, jeżeli torowisko jest częścią jezdni. Wysokość zawieszenia 5 m dopuszcza się na terenie zajezdni. Wysokość ta może być zmniejszona w wyjątkowych przypadkach, w istniejących stałych budowach i konstrukcjach po uzgodnieniu z władzami lokalnymi.

Przewody jezdne w tunelu

W tunelu przewidzianym docelowo dla taboru metra dopuszcza się wyjątkowo (z uwagi na szczupłość miejsca) obniżenie przewodu jezdnej do wysokości 3,9 m pod warunkiem dostosowania odbieraka prądu (pantografu) do pracy na takiej wysokości. W tunelu przewidzianym docelowo tylko dla trakcji tramwajowej, wysokość 4,2–3,9 m zawieszenia przewodu jezdnej sieci trakcyjnej wynika z wysokości tunelu. Wysokość tunelu winna być określona każdorazowo w wyniku analizy techniczno-ekonomicznej przedsięwzięcia. Przy zawieszeniu przewodu jezdnej poniżej 4,2 m odbierak prądu (pantograf) i tramwaj winien być dostosowany do tej wysokości.

Odległości od sieci jezdnej prowadzonej w tunelu przewidzianym dla tramwaju winny wynosić minimum:

- ♦ przewód sieci jezdnej – strop tunelu 0,25 m,
- ♦ przewód sieci jezdnej – odciągnięty (złożony) odbierak prądu 0,2 m.

Skrzyżowania z liniami kolejowymi

Na skrzyżowaniach jednopoziomowych z liniami kolejowymi niezelektryfikowanymi najniższa wysokość przewodu jezdnej nad główką szyny kolejowej nie powinna być mniejsza od 5,5 m przy największym zwisie.

Profilowanie zawieszenia przewodów jezdnych

Zmiana wysokości zawieszenia przewodu jezdnej – profilowanie – powinna być przeprowadzona stopniowo z pochyleniem nie większym niż 1,5% zgodnie z PN-K-92002. Dla prędkości większej niż 40 km/h zaleca się pochylenie dwustopniowe. Na pierwszym odcinku zmiany wysokości, niemniejszym niż 10 m, należy ograniczyć pochylenie do 1%.

Na odcinku, na którym nie jest możliwe zastosowanie takiego pochylenia dopuszcza się pochylenie 2,5% przy prędkościach <50 km/h zgodnie z normą PN-EN 50119:2009.

Różnice w wysokości zawieszenia wyznaczamy ze wzoru

$$\Delta h = a \cdot p \quad (2)$$

gdzie :

a – odległość między punktami podwieszenia [m],

p – pochylenie [%].

Zygzakowanie przewodów jezdnych na prostej

Na odcinkach prostych torów przewód jezdny powinien być prowadzony z zastosowaniem zygzakowania (odsuwu) od osi toru. Jako odsuw normalny przewodu jezdnej należy przyjmować na prostej $\pm 0,3$ m. Cykl odsuwów powinien zamykać się na odcinku ok. 120 m. Odcinek przejścia z jednej na drugą stronę osi toru nie powinien być dłuższy niż 100 m. Przy skracaniu odcinka poniżej 40 m należy uwzględnić wzrost sił załomowych.

W sieciach dwutorowych zawieszonych na wspólnym słupie zygzakowanie należy prowadzić symetrycznie względem osi torowiska. Zapewni to zmniejszenie obciążenia słupa. Sieci jezdne łańcuchowe powinny być w zasadzie pionowe, to znaczy z równoczesnymi, jednakowymi odsuwami linki nośnej i przewodu jezdnej. Dopuszcza się różnice w odsuwach jednak nie większe niż 10% wysokości konstrukcyjnej sieci i równocześnie nie więcej niż 0,1 m.

Zwis przewodu jezdnej

Zwis przewodu jezdnej liczony w środku przęsła nie powinien przekraczać 0,35 m.

Dla liny nośnej sieci (wielokrotnej) łańcuchowej zwis maksymalny w środku przęsła obliczamy ze wzoru:

$$f = \frac{a^2 \cdot G_{si}}{8 \cdot X} \quad (3)$$

gdzie :

f – zwis maksymalny w środku przęsła,

a – długość przęsła sieci [m],

G_{si} – ciężar jednostkowy całej sieci [N/m],

X – naciąg liny nośnej [N].

Ciężar jednostkowy sieci to suma ciężaru przewodu jezdnej plus liny nośnej, zacisków i wieszaków w przeliczeniu na 1 metr biegnący sieci. Długości wieszaków znajdujących się w odległości

d od podwieszenia liny nośnej dla sieci łańcuchowej obliczamy ze wzoru:

$$lw = h_k - f + \frac{(a - 2d)^2 \cdot Gsi}{8 \cdot X} \quad (4)$$

gdzie :

f – zwis maksymalny w środku przęsła,

a – długość przęsła sieci [m],

d – odległość wieszaka od podwieszenia sieci.

Wysokość konstrukcyjna sieci powinna być większa od maksymalnego zwisu o co najmniej 0,3 m. Przy mniejszych długościach wieszaków powinno się stosować wieszaki suwliwe. Skracanie długości wieszaków grozi ich częstym zrywaniem. Naturalne przesunięcia między liną nośną i przewodem jezdny prowadzą do występowania nadmiernych sił w wieszakach. Zniekształca to profilowanie wysokości zawieszenia co pogarsza współpracę odbieraka z siecią trakcyjną. Zjawisko to jest znaczne w początkowym okresie pracy wszystkich rodzajów sieci. W sieci półskompensowanej dodatkowo występują duże różnice przesunięć przewodu i liny nośnej blisko przęsła kotwowego [1].

Prowadzenie sieci na łukach

Poniżej przedstawione zostają tabele z rozpiętością przęsła na łukach, dla których nie zostaje przekroczony dopuszczalny odśuw przewodu od osi toru 0,4 m niezależnie od wywiania wiatrowego. Uwzględnione zostały również odchyłki montażowe od osi toru do 0,05 m i odchyłki podwieszenia sieci wzdłuż osi toru do 0,5 m. Wartości te są większe niż dopuszczane przez normę. Należy jednak zwrócić uwagę na nieprzekraczanie maksymalnego kąta załamania przewodów w miejscu podwieszenia.

Obliczeń dla łuku dokonuje się na podstawie wzoru

$$a = 2\sqrt{(R + Z)^2 - (R - n)^2} \quad (5)$$

gdzie:

R – promień łuku [m],

b – długość użyteczna ślizgacza pantografu w 0,8 m (całkowita długość ślizgacza = 1 050 mm wg PN-K-92004),

a – długość maksymalna cięciwy – rozpiętości przęsła [m],

n – przesunięcie przewodu w środku przęsła od stycznej do wewnątrz łuku.

Dla łuków o największych rozpiętościach $n = 0$.

Dla łuków o promieniach najmniejszych maksymalna wartość $n = 0,3$ m.

Przewody jezdne

Podstawowym elementem sieci trakcyjnej są przewody jezdne. To one w największym stopniu decydują o trwałości i niezawodności sieci trakcyjnej. Podstawowo stosowany jest aktualnie je-

Tab. 1. Maksymalne rozpiętości przęsła na łuku (dla przewodów nieskompensowanych i sieci półskompensowanej)

R [m]	20	25	30	40	50	60	75	100	150	200	250
a [m]	10,2	11,4	12,4	14,5	16,1	17,6	18,1	20,5	23,2	26,8	29,0
R [m]	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
a [m]	30,0	31,3	33,4	35,5	37,4	39,2	40,2	42,1	43,7	45,3	46,8
R [m]	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500				
a [m]	49	51,9	54,5	56,4	59	61,5	63				

den przekrój przewodu 100 mm² Cu jako typowy. Zmniejsza to koszty serwisu i podwyższa jego jakość. W sieciach trakcyjnych kolejowych w Polsce stosowane są również przewody 150 mm². Nie są one polecane do zastosowań tramwajowych ze względu na nietypowość co wiązałoby się z koniecznością wprowadzania specjalnego sprzętu do ich obsługi. Ponieważ jest dostępny przewód srebrowy Djps100 – CuAg0,1 zaleca się jego stosowanie. Przewody srebrowe o zawartości 0,1% Ag cechuje podwyższona kilkukrotnie ścieralności w stosunku do przewodów miedzianych. Ich wytrzymałość na zerwanie jest nieznacznie wyższa niż przewodów miedzianych do 380 MPa. Jednocześnie ich rezystancja jest porównywalna 0,182 Ω/km [11]. Jest to szczególnie istotne w przypadku eksploatacji na linii nowoczesnych długich tramwajów zespolonych z jednym odbierakiem ze względu na zagrożenie przegrzaniem przewodu i możliwością wystąpienia procesu rekryształizacji. Przewody Djps100 ulegają procesowi rekryształizacji przy temperaturze o ok. 100°C wyższej niż przewody miedziane. W obszarach przystanków przed skrzyżowaniami ze światłami, w okresie letnich upałów, przewody trakcyjne są szczególnie intensywnie nagrzewane i zagrożone przegrzaniem. Wiąże się to z wprowadzaniem klimatyzacji w tramwajach. W okresie tworzenia się szronu na przewodach występuje iskrzenie między nakładką stykową i przewodem jezdny. Przewody srebrowe ze względu na swe właściwości są znacznie odporniejsze na uszkodzenia w takich warunkach. W efekcie ich trwałość eksploatacyjna jest kilkukrotnie dłuższa szczególnie na silnie obciążonych odcinkach. W przewodach jezdnych przy temperaturze $t = 248$ K (-25°C) naprężenie nie może przekroczyć dopuszczalnego naprężenia przewodu dla danego rodzaju materiału.

Dopuszczalne naprężania dla przewodów nowych wynoszą:

- ♦ przewodu z miedzi twardej 120 MPa (120 N/mm²),
- ♦ przewodu z miedzi srebrowej 120 MPa (120 N/mm²).

Przy skompensowanym zawieszeniu przewodu jezdny naprężenie obliczeniowe przewodu nowego z miedzi twardej i srebrowej nie może przekroczyć 100 MPa.

Minimalne naprężenia w przewodzie jezdny przy temperaturze $t = 313$ K/+40°C/ nie powinny być niższe dla przewodu z miedzi twardej niż 40 MPa (40 N/mm²).

Gdy występują w obliczeniach naprężenia niższe należy zastosować kompensację temperaturową lub zapewnić małe zwisy – poniżej 50% zwisu dopuszczalnego.

Dopuszczalne naprężenia maksymalne i minimalne dotyczą najniższych i najwyższych temperatur, dla których sporządza się tabelę naprężeń i zwisów. Przedział zmienności temperatur wynosi od 248 K do 313 K (-25 °C do +40 °C).

Mimo występujących w Polsce przewodów z miedzi kadmowej nie należy ich stosować w nowych konstrukcjach. Przewody te mają bardzo dobre właściwości mechaniczne. Kadm jednak jest metalem trującym i stosowanie jego stopów łączy się w Europie z silnymi ograniczeniami.

Naprężenia w stanie maksymalnego zużycia i w warunkach granicznych nie mogą przekroczyć wartości dopuszczalnych zgodnie z normą PN-EN 50119.

Jako maksymalny poziom średniego zużycia przewodu jezdny należy przyjmować 20%.

Liny nośne

Na konstrukcje nośne wzdłużne w sieciach łańcuchowych stosuje się liny nośne. Do sieci wielokrotnych/łańcuchowych linki nośne należy stosować z miedzi lub jej stopów (z wyłączeniem

stopu z kadmem). Własności elektryczne i mechaniczne lin nośnych miedzianych powinny być zgodne z PN-EN-50182.

Znamionowy przekrój linek nośnych nie powinien być mniejszy od 95 mm² dla linek miedzianych i 70 mm² dla linek krzemobrazowych, przy średnicy drutów co najmniej 2 mm. Poleca się stosowanie typowych linek miedzianych typu L95, L120, L150 o przekrojach 95 mm², 120 mm², 150 mm² lub linek krzemobrazowych typu BL70, BL95, BL120 o przekrojach 70 mm², 95 mm², 120 mm².

W linie nośnej naprężenie wzdłużne przy temperaturze $t = 248 \text{ K} (-25^\circ\text{C})$ nie może przekroczyć dopuszczalnego naprężenia dla danego rodzaju materiału.

Wynoszą one:

- ♦ 190 MPa (190 N/mm²) – dla miedzi przewodowej twardej o wytrzymałości doraźnej na rozciąganie 400 MPa (400 N/mm²),
- ♦ 175 MPa (175 N/mm²) – dla miedzi przewodowej twardej o wytrzymałości doraźnej na rozciąganie 350 MPa (350 N/mm²),
- ♦ 250 MPa (250 N/mm²) – dla brązu krzemowego o wytrzymałości doraźnej na rozciąganie 500 MPa (500 N/mm²).

Przy skompensowanym zawieszeniu liny nośnej naprężenia obliczeniowe nie mogą przekroczyć:

- ♦ 140 MPa (140 N/mm²) – dla miedzi przewodowej twardej,
- ♦ 250 MPa (250 N/mm²) – dla miedzi kadmowej,
- ♦ 200 MPa (200 N/mm²) – dla brązu krzemowego.

Ze względu na wymagany zakres parametrów sieci i wystarczające parametry miedzi nie jest wymagane stosowanie lin nośnych z miedzi srebrowej.

Linka wieszakowa

Typowo na wieszaki stosuje się linkę giętką z miedzi miękkiej o przekroju 10 mm², o podwójnym splocie 7 razy 7 drutów.

Połączenia wyrównawcze

W sieci trakcyjnej połączenia wyrównawcze między dwiema sieciami należącymi do tej samej sekcji zasilania równoległych torów tramwajowych winny być instalowane w odległościach co ok. 200 m, lecz nie większych niż 300 m. Sieć jezdna powinna być połączona z przewodem wzmacniającym w odstępach nie większych niż 300 m.

Połączenia wyrównawcze winny być wykonane linką miedzianą o przekroju dostosowanym do przekroju łączonych sieci jezdnych, lecz nie mniejszym niż 70 mm².

Obciążalność prądowa przewodów miedzianych i aluminiowo-stalowych:

- ♦ przewody jezdne: Djp, DjpM100 – 600 A,
- ♦ liny: L70 – 470 A, L95 – 690 A,
- ♦ liny aluminiowo-stalowe: AFL95 – 335 A, AFL120 – 380 A, AFL150 – 445 A, AFL185 – 515 A, AFL240 – 616 A, AFL300 – 716 A.

Podsumowanie

Sieci trakcyjne tramwajowe mimo prostej struktury konstrukcyjnej ulegają istotnym zmianom. Zmiany te zostały wymuszone wymaganiem zmniejszenia awaryjności, obniżenia kosztów

serwisowania, podwyższeniem obciążalności i trwałości. Nowe materiały, jak i nowe rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na poprawę funkcjonowania sieci.

Bibliografia

1. Głowacki K., Onderka E., *Sieci trakcyjne*, Emtrak, Kraków 2002.
2. Maciołek T., Głowacz M., *Współpraca pantografu z siecią trakcyjną tramwajową na skrzyżowaniu*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, nr 1.
3. Maciołek T., *Skrzyżowanie tramwajowe – newralgiczny punkt sieci trakcyjnej*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 12.
4. Maciołek T., *Wybrane aspekty projektowania sieci trakcyjnych dużych prędkości*, „Technika Transportu Szynowego” 2012, nr 10.
5. PN-EN 50119 – *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Sieć jezdna górna trakcji elektrycznej*.
6. PN-EN 50122-2:2003 (U) – *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Część 2: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędnych wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego*.
7. PN-K-92002:1997 – *Komunikacja miejska. Sieć jezdna tramwajowa i trolejbusowa*.
8. Szelaż A., Maciołek T., *Elektroenergetyka trakcyjna linii kolejowych w Polsce – uwagi dotyczące procesu projektowania*, „Technika Transportu Szynowego” 2012, nr 7–8.
9. Szelaż A., Drażek Z., Mierzejewski L., *Metoda symulacyjna obliczania obciążeń sieci tramwajowej*, „Technika Transportu Szynowego” 2002, nr 2.
10. Szelaż A., Maciołek T., *Rozwiązania techniczne w układach zasilania poprawiające efektywność energetyczną transportu szynowego*, „Pojazdy Szynowe” 2015, nr 3.
11. Szelaż A., Maciołek T., Knych T., Mamala A., Kawecki A., Kwaśniewski P., Kieniewicz G., Rojek A., Majewski W., Woźniak K., Koczaj R., Masłanka J., *New Material and Design Solutions for Polish Railway Overhead Lines, The Second International Conference on Railway Technology: Research Development and Maintenance*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 144, 2014.
12. *Wytyczne projektowania, budowy i odbioru sieci trakcyjnej oraz układów zasilania 2x25 kV AC dla prędkości jazdy $V \leq 350 \text{ km/h}$* , Kolprojekt dla PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2007.

Autor:

dr hab. inż. **Tadeusz Maciołek** – Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Trakcji Elektrycznej, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, e-mail: tadeusz.maciolek@ee.pw.edu.pl

Selected design issues of tram traction catenary

The paper presents problems of modernization and construction of new tram overhead catenary. Implementation of modern materials and equipment allows improvements of catenary exploitation. Construction size and load parameters of basic structure of overhead catenary are described. New solutions of tensioning equipment are as well presented.

Tab. 2. Dopuszczalne temperatury przewodów i lin według EN50119:2009

Materiał	Temperatury		
	prąd 1 sekundowy	prąd 30 minutowy	prąd ciągły
miedź	170	120	80
miedź srebrowa 0,1 Ag	200	150	100