

Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej (2)

Artykuł jest kontynuacją artykułu opublikowanego pod tym samym tytułem w tfs 7-8/2001 i zawiera omówienie metod oraz przykładowe wyniki obliczeń parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej.

System komunikacyjny linii tramwajowych do celów projektowych układu elektroenergetycznego przedstawia się w postaci schematów zastępczych układu zasilania o różnorodnym stopniu uproszczenia, zależnym od stosowanej metodologii obliczeń. Schematy te obejmują informacje o wstępnie przyjętych założeniach dotyczących: wielkości obszarów zasilania podstacji, lokalizacji punktów zasilających i powrotnych, długości kabli zasilających i powrotnych, długościach odcinków zasilania i przekrojów elektrycznych głównych torów prądowych.

Klasyczna metoda obliczeń sieci powrotnej

W klasycznej metodzie obliczeń, opartej na równaniach Kirchoffa, określano rozptyw prądu (dla obciążeń średniorocznych) w sieci szynowej wraz z lokalizacją punktów rozptywu. Zakładano zwykle przy tym lokalizację wstępną i równość potencjałów punktów powrotnych, co znacznie ułatwiało przeprowadzenie obliczeń, lecz miało się znacznie z rzeczywistością, jako że w typowym przypadku punkty powrotne mają różne potencjały (ze względu na różne rezystancje kabli powrotnych, różne konfiguracje sieci szynowej i różne obciążenia odcinków).

Obciążenia prądowe poszczególnych odcinków sieci jezdnej lub szynowej najprościej jest wyznaczyć w postaci obciążeń rozłożonych równomiernie (między węzłami sieci szynowej lub między izolatorami wzdłużnymi sieci jezdnej) na podstawie wielkości charakteryzujących gęstość

ruchu, jednostkowe zużycie energii i długości odcinków z zależności:

$$\Delta i = \frac{a \cdot n}{U_s} \tag{1}$$

gdzie:

- Δi – okład prądowy odcinka [A/km],
- a – średnie jednostkowe zużycie energii [Wh/wozokm],
- U_s – średnie napięcie w sieci trakcyjnej [V],
- n – częstotliwość ruchu dla kierunku lub potoku [wozy/h].

Obliczenia rozptywu prądów w sieci jezdnej i szynowej wymagają zastąpienia obciążeń rozłożonych równomiernie obciążeniami zastępczymi (rys. 1 i 2). Na ogół przyjmuje się za podstawę zależność:

$$I_i = \Delta i_i \cdot L_i \tag{2}$$

gdzie:

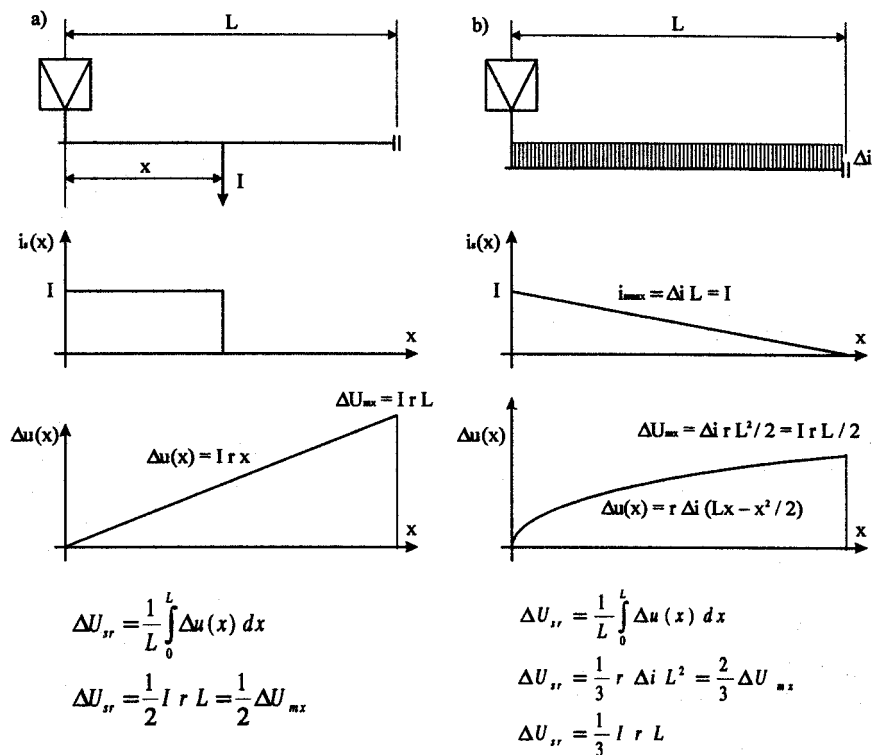
- I_i – średnie obciążenie prądowe równoważne na odcinku i -tym [A],
- L_i – długość odcinka równoważnego [km].

Na rysunkach 1 i 2 zamieszczono poglądowe zestawienia schematów zastępczych obciążenia skupionego i rozłożonego równomiernie dla zasilania jednostronnego i dwustronnego, a także zestawienia wzorów opisujących rozptyw prądów i spadki napięć. Przyjęto następujące oznaczenia:

$\Delta u(x)$ – spadek napięcia od obciążenia skupionego I lub rozłożonego o okładzie Δi w funkcji długości odcinka zasilania,

$i_s(x)$ – prąd sieci (szynowej lub powrotnej) w funkcji długości odcinka x , od punktu zasilającego lub powrotnego do odbioru,

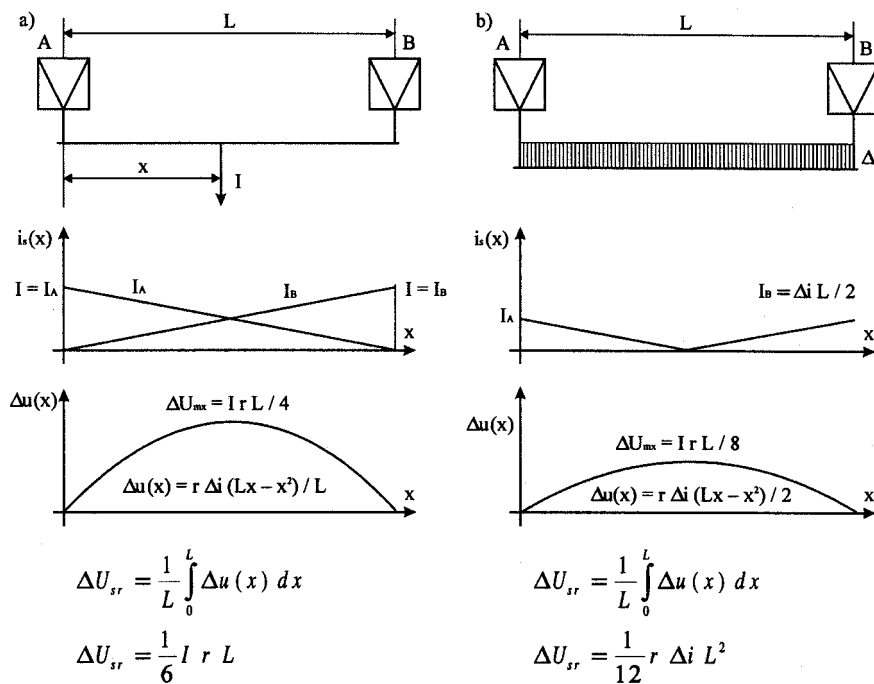
ΔU_{mx} – maksymalny spadek napięcia na odcinku,



Rys. 1. Schematy zasilania jednostronnego a) z obciążeniem skupionym, b) z obciążeniem rozłożonym

ΔU_{sr} – średni spadek napięcia na odcinku do pantografu dla odbioru skupionego / poruszającego się po odcinku ze stałą prędkością lub dla obciążenia rozłożonego równomiernie.

Na rysunkach 3 i 4 zamieszczono schematy i wzory do obliczeń przy zastępowaniu obciążeń rozłożonych równomiernie obciążeniami skupionymi.



Rys. 2. Schematy zasilania dwustronnego a) z obciążeniem skupionym, b) z obciążeniem rozłożonym równomiernie

Na podstawie omówionych i zamieszczonych na rysunkach 2÷4 zależności wyprowadzono wzory do obliczeń rozplywu prądów i spadków napięć w układzie sieci powrotnej. Odległość punktu rozplywu od początku i -tego odcinka sieci szynowej, na którym się ten punkt znajduje, można obliczyć z zależności:

$$L_n = \frac{I'_i}{I_i} L_i \text{ [km]} \quad (3)$$

gdzie:

L_n – odległość punktu rozplywu od początku i -tego odcinka [km],

I'_i – prąd płynący na początku i -tego odcinka [A],

I_i – obciążenie i -tego odcinka [A],

L_i – długość i -tego odcinka [km].

Maksymalny spadek napięcia na wydzielonym i -tym odcinku sieci (rys. 3) określają zależności:

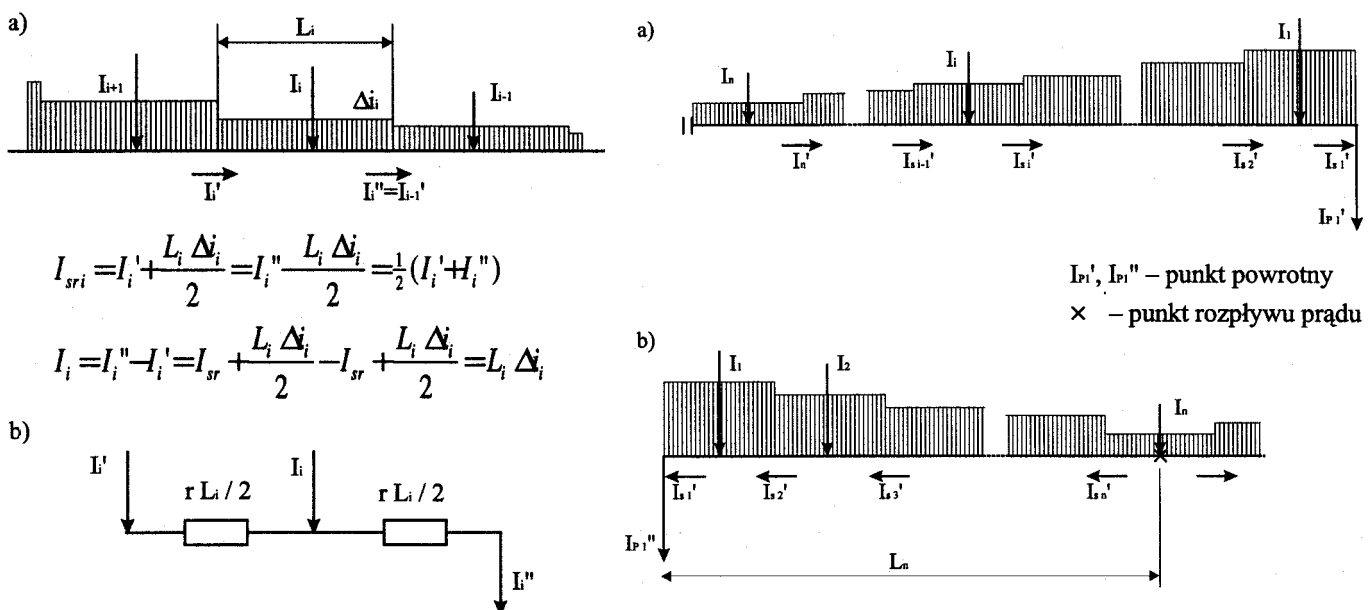
$$\Delta U_{mi} = I r L_i + I_i \frac{r L_i}{2} = I r L_i (I'' - I') \frac{r L_i}{2} \quad (4)$$

$$R_i = L_i r$$

$$\Delta U_{mi} = \frac{1}{2} (I' + I'') \cdot r R_i$$

Maksymalny spadek napięcia od punktu powrotnego do końca sieci określa się z zależności:

$$\Delta U_m = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{1}{2} R_i (I_i + I'_i) + \frac{1}{2} R_n I_n \quad (5)$$



Rys. 3. Schemat zastępczy ilustrujący metodę dyskretyzacji przy zastępowaniu obciążeń rozłożonych równomiernie obciążeniami skupionymi

Rys. 4. Rozplyw prądów w obwodzie sieci szynowej a) do obliczeń spadku napięcia od punktu powrotnego do krańca odcinka (wzór 9), b) od punktu powrotnego do punktu rozplywu z wykorzystaniem metody dyskretyzacji (wzór 10)

zaś spadek napięcia od punktu powrotnego do punktu rozpląwu prądu (rys. 4b) określa zależność:

$$\Delta U_m = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{1}{2} R_i (I_i + I'_i) + \frac{1}{2} R_n \frac{(I_n'')^2}{I_n} \quad (6)$$

Długość drogi, po której liczony jest spadek napięcia, wynosi:

$$L_{\Delta U_m} = \sum_{i=1}^n L_i + L_n \frac{I_n'}{I_n} \quad (7)$$

oraz

$$\Delta U_{sr} = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n U_{\max} = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (I_i + I'_i) R_i \quad (8)$$

We wzorach (4)÷(8):

n – liczba odcinków,

i – kolejny numer odcinka, $i = 1, 2, \dots, n$,

R_i – rezystancja i -tego odcinka [Ω],

I'_i – prąd płynący na początku i -tego odcinka [A],

I''_i – prąd płynący na końcu i -tego odcinka [A],

I'_n – prąd płynący na początku n -tego odcinka [A],

I_n – prąd obciążenia n -tego odcinka [A].

Wzór (8) stanowi uproszczoną postać (zdyskretyzowaną) wzorów całkowych z rysunków 1b i 2b i nawiązuje do schematów odcinkowych (dyskretnych) z rysunków 3 oraz 4a i b.

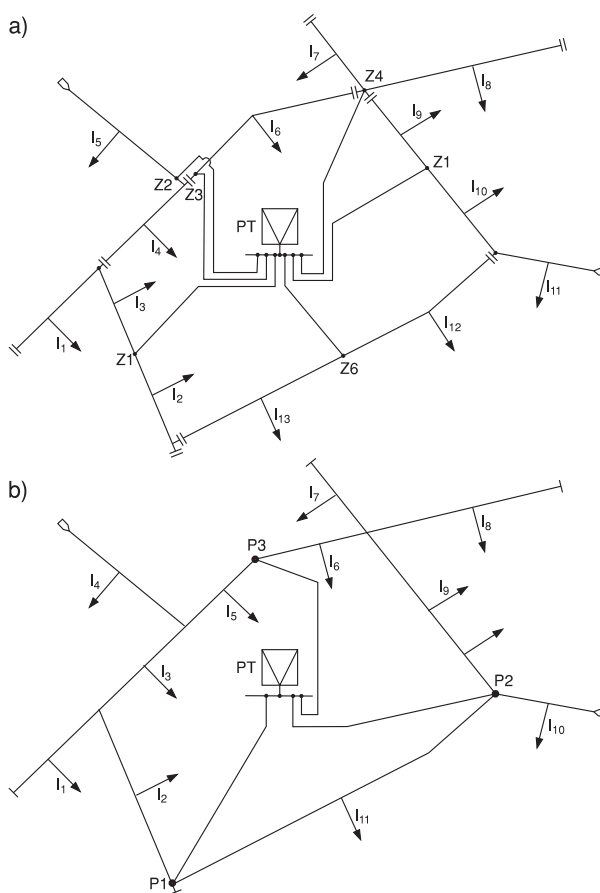
Wzory te pokazują, jakie znaczenie ma dla dokładności obliczeń sieci powrotnej określenie rozpląwu prądów w szynach i kablach powrotnych, co ze względu na przyjmowane – a zwykle nie spełnione – założenie równości potencjałów punktów powrotnych jest obciążone znacznym błędem, zwłaszcza w przypadku złożonej konfiguracji sieci i nierównomiernego rozmieszczenia punktów powrotnych. O dokładności obliczeń w tej metodzie decyduje również liczba i długość odcinków, na jakie do obliczeń był dzielony układ zasilania podstacji – im więcej i im krótsze były odcinki, tym uzyskiwano bardziej dokładne wyniki.

Obliczenia rozpląwu prądów w sieci jezdnej przy stosowanym powszechnie zasilaniu jednostronnym są znacznie prostsze i sprowadzają się do sumowania prądów gałęzi zasilanych jednostronnie.

Na rysunku 5 zamieszczono przykładowy obszar zasilania podstacji z podziałem na odcinki zasilania zawarte między izolatorami sekcyjnymi sieci jezdnej (rys. 5a) i z podziałem na punkty i obwody powrotne zawarte między punktami powrotnymi P1-P2-P3 (rys. 5b).

Na podstawie ogólnych zależności (1)÷(8) wyprowadzono wiele wzorów szczególnych do określenia wybranych parametrów obwodu zasilania w oparciu o przyjęte kryteria jakościowe. Zagadnieniom analizy obwodu zasilania poświęcono wiele publikacji i opracowań badawczych, m.in.: [5, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 18, 22, 23].

Wiele zagadnień omówiono w pracach Rozenfelda [26] i Dzikowskiego [9]. Ogólnie wszelkie zależności teoretyczne wywodzą się z metody analizy schematów chwilowych i metody średnich obciążeń [9, 16, 26, 27]. Danymi dla obu me-



Rys. 5. Uproszczone schematy sieci trakcyjnej
a) obszaru zasilania podstacji PT z podziałem na odcinki zasilania, b) sieci szynowej (powrotnej)

tod są: częstotliwości ruchu (rozkłady jazdy), charakterystyki i parametry tramwajów, układ tras i przystanków. W oparciu o te dane wyznacza się przebiegi prądów z poszczególnych przejazdów typowego pojazdu i jednostkowe zużycie energii. Zakłada się zwykle stałą prędkość jazdy równą średniej v_{sr} , co pozwala na uśrednianie wielkości obliczonych w funkcji drogi (liniowa zależność od czasu).

Stąd:

$$v_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (9)$$

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{L} \int_0^L i dl ; v = const \quad (10)$$

lub

$$I_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^k I_i \Delta t}{\sum \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^k I_i l_i}{k} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

gdzie:

v – zmienna prędkość,

i – prąd o zmiennej wartości,

I_{sr} – średnia wartość prądu w okresie T lub po przejechaniu odcinka długości L ,

I_i – wartość prądu w i -tym przedziale (średnia),

k – liczba przedziałów,

L – długość odcinka, dla którego obliczana jest wartość średnia prądu.

Okład prądowy wynosi:

$$\Delta i = \frac{\sum_{i=1}^k I_i}{L} \quad (12)$$

lub

$$\Delta i = \frac{A}{U_{sr} \cdot T \cdot L} \quad (13)$$

$$\Delta i = \sum_{j=1}^m \frac{m_j \cdot a_{srj}}{U_{sr}}; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$\Delta i = \frac{a_{sr} \cdot N_{sr}}{U_{sr}} \quad (15)$$

$$N = \frac{L \cdot n_{sr}}{U_{sr}} \quad (16)$$

gdzie:

A – zużycie energii przez pojazdy na odcinku L w czasie obliczeniowym,

U_{sr} – średnia wartość napięcia,

m_j – masa pojazdu j -tego typu,

a_{sr} – uśrednione dla całego ruchu jednostkowe zużycie energii,

a_{srj} – zużycie energii jednostkowe przez pojazd j -tego typu,

N_{sr} – średnia liczba pojazdów znajdujących się jednocześnie na odcinku L ,

n_{sr} – średnia częstotliwość ruchu dla jednego lub obu kierunków w zależności od układu połączeń w sieci jezdnej.

Dokładną wartość jednostkowego zużycie energii wyznacza się z pomiarów:

$$a_{sr} = \frac{1}{m_p L} \int_0^T U_p(t) \cdot i_p(t) \cdot dt \quad (17)$$

– lub z obliczeń przejazdu teoretycznego:

$$\int_0^L F(l) dl = k \cdot m \int_0^L \frac{dv}{dt} dl + \int_0^L W(l) dl \quad (18)$$

Po podzieleniu (18) przez m i L (masa i droga) otrzymujemy:

$$a_{sr} = \frac{1}{mL} \int_0^L F(l) dl = \frac{k}{L} \int_0^L \frac{dv}{dt} dl + \frac{1}{mL} \int_0^L W(l) dl \quad (19)$$

Jak można zauważyć w (19) wartość jednostkowego zużycia energii jest funkcją zmiennego przyspieszenia dv/dt (przyrost lub strata energii kinetycznej) oraz pracy wykonanej na przezwyciężenie siły W oporów ruchu.

Pozostałe oznaczenie we wzorach (18) i (19):

m – masa,

k – współczynnik mas wirujących,

l – zmienna położenia,

F – siła pociągowa.

Wartość średniokwadratowa prądu (zastępcza) w czasie jazdy z poborem prądu, stanowiąca podstawę do wymiarowania torów prądowych, jest wyznaczana z zależności:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (20)$$

lub

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum I_i^2 \Delta t} \quad (21)$$

Do obliczeń projektowych wykorzystuje się zależności o postaci:

$$I_{sk} = \sqrt{\varepsilon i_{sr}^2 \cdot k_e^2} \quad (22)$$

gdzie:

ε – stosunek wartości średniej prądu w okresie jazdy z poborem energii do wartości średniej prądu pobranego w czasie całego przejazdu odcinka, łącznie z wybiegiem i hamowaniem,

k_e – stosunek wartości średniokwadratowej prądu zasilacza lub podstacji do wartości średniej – zależność podawana w formie zbiorów liczbowych lub wykresów [9] dla obszaru zasilacza lub podstacji:

$$k_e = \sqrt{\varepsilon} \cdot k_{ep} \quad (23)$$

gdzie:

k_{ep} – współczynnik wartości zastępczej prądu pojazdu (obliczenia przejazdu teoretycznego).

Wykorzystywane są też zależności określające:

– wartość średniokwadratową:

$$I_z = I_{sr} \sqrt{1 + \frac{\beta}{N}} \quad (24)$$

gdzie:

β – współczynnik liczbowy wynoszący $2 \div 4$,

– wartość maksymalną:

$$I_{max} = I_{sr} \left[1 + \frac{z_p \sqrt{k_e^2 - 1}}{\sqrt{n}} + \frac{z_p (k_3^3 - 3k_e^2 + 2)}{2n (k_e^2 - 1)} \right] \quad (25)$$

Po podstawieniu współczynników liczbowych o przeciętnych wartościach wzór (29) przekształca się do postaci:

$$I_{max} = I_{sr} \left[1 + \frac{3,7 \sqrt{\beta}}{\sqrt{n}} + \frac{3,7(\gamma + 2)}{2n\beta} \right] \quad (26)$$

gdzie:

$$\beta = k_e^2 - 1 \quad (27)$$

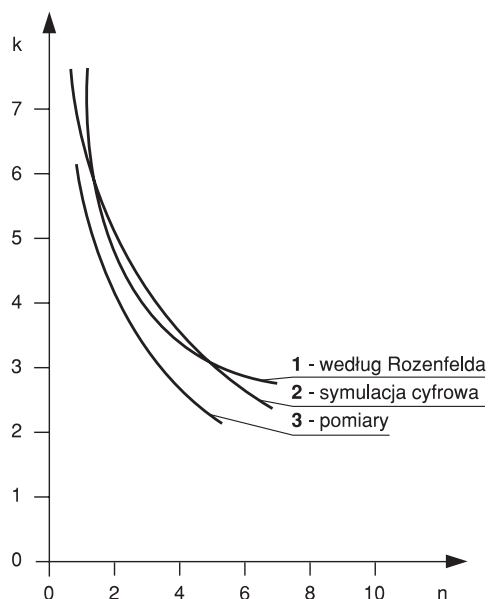
$$\gamma = k_3^2 - 3k_e^2 \quad (28)$$

z_p – współczynnik zależny od prawdopodobieństwa przekroczenia określonego poziomu wartości prądu.

Dysponując wykresem $k(n)$ zależność (25) upraszcza się do postaci:

$$I_{max} = I_{sr} k \quad (29)$$

Na rysunkach 6 i 7 zamieszczono wykresy wartości współczynnika k w funkcji częstotliwości ruchu n .



Rys. 6. Wykres wartości współczynnika k w funkcji średniej wartości n dla $n > 1,5$

Do sumowania wartości średniokwadratowych prądów zasilaczy w celu określenia prądu zastępczego podstacji I_{psk} wykorzystano zależność:

$$I_{psk}^2 = \left(\sum_1^m I_{sr_i} \right)^2 + \sum_1^m (I_{sk_i}^2 - I_{sr_i}^2) \quad (30)$$

gdzie:

I_{sr_i} – prąd średni zasilacza o indeksie i ,

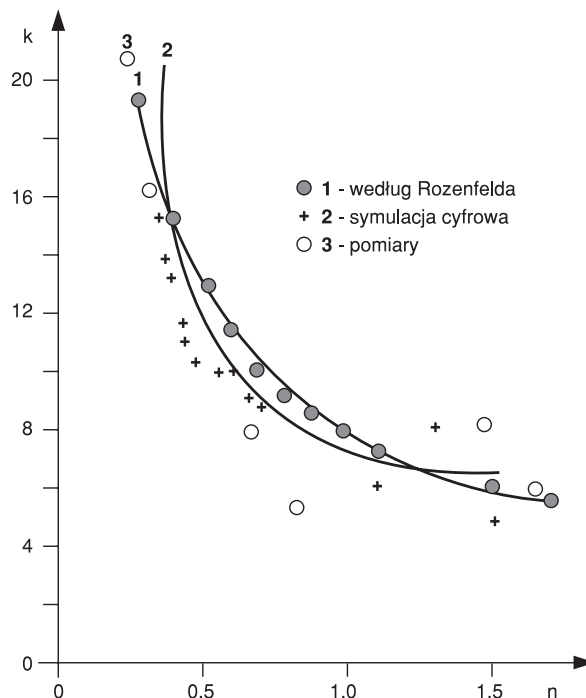
I_{sk_i} – prąd średniokwadratowy zasilacza o indeksie i .

Szacowanie parametrów strukturalnych sieci trakcyjnej w oparciu o zależności przybliżone

Układy zasilania elektroenergetycznego charakteryzują się specyficzną strukturą zawierającą obwody zasilające prądu przemiennego, podstacje przekształtnikowo-rozdzielcze oraz obwody prądu stałego zasilające pojazdy trakcyjne.

Obwód sieci trakcyjnej zawiera kable zasilaczy, sieć jezdnią górną, szynową sieć dolną oraz kable powrotne. Każdy z elementów sieci trakcyjnej projektowany jest w oparciu o inną, dostosowaną do specyfiki pracy i wymaganych parametrów urządzeń metodologię. Dla sieci trakcyjnej parametrami o znaczeniu podstawowym są długości sekcji zasilania sieci jezdnej, odcinków sieci szynowej związanych z rozplywem prądów do kabli powrotnych, kabli zasilających i powrotnych oraz przekroje (rezystancja jednostkowa [Ω/km]) wymienionych elementów toru prądowego. Podział na odcinki i sekcje obwodów zasilających i powrotnych związany jest z lokalizacją przyłączy kabli zasilających do sieci jezdnej i kabli powrotnych do szyn.

Wielkościami kryterialnymi do określenia maksymalnych długości L_{sz} odcinków sieci szynowej są dopuszczalne średnie roczne spadki napięć U_{srr} , zaś dopuszczalne długości L kabli powrotnych, kabli zasilających oraz sieci jezdnej ograniczone są wartościami spadków napięć ΔU_{szcz} w okresie ru-



Rys. 7. Wykres wartości współczynnika k w funkcji średniej wartości n dla $n \leq 1,5$

chu szczytowego. Przekroje sieci i kabli są dobierane z uwzględnieniem dopuszczalnych obciążeń szczytowymi prądami zastępczymi I_{zszcz} oraz dopuszczalnych spadków napięć ΔU_{dop} (średnich i maksymalnych). W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych należy zmniejszyć długości odcinków lub ich rezystancję (przekrój).

Rejony spływu w sieci szynowej i kable powrotne

W obliczeniach przybliżonych przyjmowane jest założenie upraszczające dotyczące równości potencjałów średnich rocznych punktów sieci szynowej, do których przyłączone są kable powrotne. W rzeczywistości założenie takie przekłada się na warunek równości średnich rocznych spadków napięć ΔU_{srrkp} we wszystkich kablach powrotnych.

$$\Delta U_{srrkp_i} = I_{sr_i} \cdot r_{sz_i} \cdot L_{sz_i} = \text{const} \quad (31)$$

gdzie:

$$I_{sr_i} = \Delta i_{sr_i} \cdot N_i \cdot L_i$$

I_{srr} – prąd średni roczny kabla,

r_{sz} – rezystancja jednostkowa kabla,

L_{sz} – długość kabla,

i – numer kolejny (identyfikator) kolejnego kabla,

k – liczba kabli powrotnych w rejonie zasilania podstacji trakcyjnej.

Dopuszczalna długość sekcji szyn, z której odbiera prąd dany kabel powrotny przy zachowaniu wymagań dotyczących średnich rocznych spadków napięć ΔU_{srr} [według PN-92 E05024], przy znanej rezystancji jednostkowej szyn, można oszacować z zależności:

$$\Delta U_{sz} = \frac{1}{8} L_{sz}^2 \cdot \Delta i_{sz} \cdot r_{sz} \left(1 + \frac{3}{N} \right) \quad (32)$$

$$N_i = \frac{L_{sz} \cdot n_{sz}}{v_{sz}} \quad (33)$$

gdzie:

N_i – liczba tramwajów (pociągów) znajdujących się jednocześnie na odcinku (sekcji),

n_{sz} – średnia roczna częstotliwość kursowania tramwajów na odcinku i -tym,

v_{sz} – średnia prędkość komunikacyjna,

r_{sz} – rezystancja jednostkowa sieci szynowej.

Wartość dopuszczalnego spadku napięcia ΔU_{sz} w sieci szynowej odnosi się do długości szyn zawartej między punktem przyłączenia kabla a końcem sekcji albo punktem rozplywu prądów powrotnych.

Po podstawieniu (33) do (32) otrzymuje się równanie kwadratowe względem niewiadomej L o postaci:

$$\frac{1}{8} r_{sz} \cdot \Delta i_{sz} \cdot L^2 + \frac{3}{8} r_{sz} \Delta i_{sz} \cdot L - \Delta U_{dop} = 0 \quad (34)$$

Zależności (32) i (33) pozwalają, po podstawieniu danych (okład prądowy i liczebność pojazdów) dotyczących szczytu, na obliczenie szczytowego spadku napięcia w sieci szynowej. Rozplyw prądów w sieci szynowej i w sieci górnej jest różny z uwagi na różną ich konfigurację.

Rozwiązując powyższe równanie i eliminując rozwiązania nie mające sensu fizycznego uzyskuje się długości sekcji szyn jezdnych, z których odbierany jest prąd przez dany kabel powrotny i ewentualne potwierdzenie prawidłowości wstępnej lokalizacji punktów powrotnych. Dopuszczalny spadek napięcia w szynach jezdnych ΔU_{dopsz} jest określany normą PN-92 E-05024 i zależy od rodzaju torowiska [28]. Zwykle dąży się do zaprojektowania jak najmniejszej liczby kabli powrotnych, dlatego w typowych warunkach jest to kryterium dominujące, ze względu na konieczność ograniczenia wpływu prądów błądzących.

Spadek napięcia w kablu powrotnym oblicza się ze wzoru:

$$\Delta U_{kp\text{szcz}} = L_{sz} \Delta i \cdot L_{kp} \cdot r_{kp} \left(1 + \frac{v_{sz}}{L_{sz} \cdot n_{sz}} \right) \quad (35)$$

Prąd zastępczy kabla powrotnego można obliczyć ze wzoru:

$$I_{kp\text{szcz}} = \Delta i \cdot L_{sz} \sqrt{1 + \frac{3v_{sz}}{n_{sz} \cdot L_{sz}}} \leq I_{zdop} \quad (36)$$

Sekcjonowanie sieci jezdnej i kable zasilaczy

Struktura sieci jezdnej w porównaniu do sieci szynowej jest znacznie prostsza dzięki sztywnemu podziałowi na wyizolowane odcinki z „własnymi” kablami zasilaczy.

Dopuszczalne obciążenie kabla zasilającego i sieci jezdnej (zasilanie jednostronne) określa zależność:

$$I_{zaszk} = D_{sekg} \cdot j \cdot \sqrt{1 + \frac{2}{N}} \leq I_{zdop} \quad (37)$$

$$N = \frac{n_{sz} \cdot D_{sekg}}{v_{kom}}$$

gdzie:

D_{sekg} – długość sekcji sieci górnej,

I_{zaszk} – prąd zastępczy kabla zasilającego,

I_{zdop} – prąd zastępczy dopuszczalny kabla zasilającego,

n_{sz} – częstość kursowania pociągów tramwajowych w szczycie [poc./h],

N – liczba pociągów jednocześnie znajdujących się w obszarze zasilania kabla.

Spadek napięcia w sieci jezdnej (zasilanie jednostronne):

$$\Delta U_s = \frac{1}{3} r_{zjs} \cdot D_{sekg}^2 \cdot j \cdot \left(1 + \frac{2}{N} \right) \leq \Delta U_{sdop} \quad (38)$$

gdzie:

r_{zjs} – rezystancja jednostkowa sieci górnej,

ΔU_{sdop} – dopuszczalna wartość spadku napięcia w sieci jezdnej.

Dopuszczalny spadek napięcia w kablu zasilającym:

$$\Delta U_{kz} = j \cdot D_{sekg} \cdot r_{jkz} \cdot D_{lkz} \cdot \left(1 + \frac{1}{N} \right) \leq \Delta U_{kzdop} \quad (39)$$

gdzie:

ΔU_{kz} – spadek napięcia na kablu zasilającym [V],

r_{jkz} – rezystancja jednostkowa kabla zasilającego [Ω/km],

D_{lkz} – długość kabla zasilającego [km],

n_{sz} – częstość kursowania pociągów tramwajowych w szczycie [poc./h],

ΔU_{kzdop} – dopuszczalna wartość spadku napięcia na kablu zasilającym [V].

W oparciu o przedstawione wzory opracowano uproszczoną metodę szacowania konfiguracji i parametrów sieci zasilającej i powrotnej, takich jak: optymalne granice rejonów zasilania, długości i przekroje kabli zasilających i powrotnych, z uwzględnieniem wzajemnego uzależnienia parametrów elementów. W trakcie realizacji pracy [17] przeprowadzono obliczenia kilkuset wariantów możliwych kombinacji parametrów, dzięki czemu uzyskano zależności graficzne między parametrami układu zasilania oraz wielkością ruchu (częstość kursowania pociągów tramwajowych). Jako wartości wyjściowe (dane do obliczeń) przyjęto:

– warunki ruchowe (typ taboru, częstości ruchu, średnie jednostkowe zużycia energii) $jze = 3,57$ [kWh/wozokm], obliczoną jako średnią ważoną intensywności ruchu dla różnych typów taboru w okresie letnim, ze wzrostem o 27% zimą;

– $czsz = 2 \times czpsz$ (częstość ruchu w szczycie dwukrotnie większa niż poza szczytem);

– czas ruchu szczytowego 8 h, pozaszczytowego – 12 h (w święta i dni wolne ruch jak poza szczytem), pociągi dwuwagonowe, sieć wielokrotna, szyny rowkowe.

Na rysunkach 8÷15 zamieszczono przebiegi charakterystycznych wielkości i parametrów obwodu zasilania trakcyjnej obliczone metodami analitycznymi dla różnych struktur układów zasilania.

Wykresy zależności dopuszczalnych długości sekcji sieci jezdnej w funkcji obciążenia prądowego Δi obliczono przy spełnieniu kryteriów dopuszczalnego:

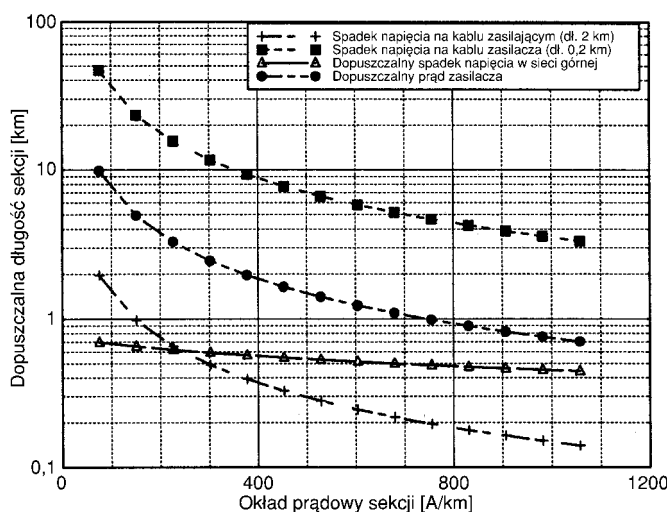
- spadku napięcia w sieci jezdnej,
- prądu zastępczego w sieci,
- spadku napięcia w kablu zasilającym,
- prądu kabla zasilacza.

Zamieszczone na rysunkach 8, 9, 10 i 11 wykresy sporządzono dla odcinków zasilanych jedno- i dwustronnie.

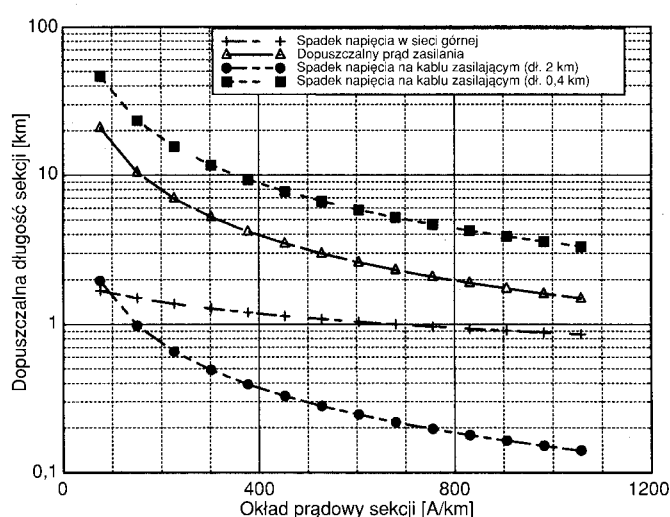
Zależność długości odcinków powrotnych sieci szynowej w funkcji średniej rocznej częstotliwości kursowania pociągów, przy kryterium ograniczającym wzdłużną jednostkową wartość spadku napięcia, zamieszczono w postaci wykresów na rysunkach 12 i 13.

Zależność dopuszczalnych długości kabli powrotnych w funkcji częstotliwości ruchu, obliczonych przy założeniu nieprzekraczania dopuszczalnych spadków napięć dla kabli o przekroju $1 \times 625 \text{ mm}^2$ do $3 \times 625 \text{ mm}^2$, zamieszczono w postaci wykresów na rysunkach 14 i 15.

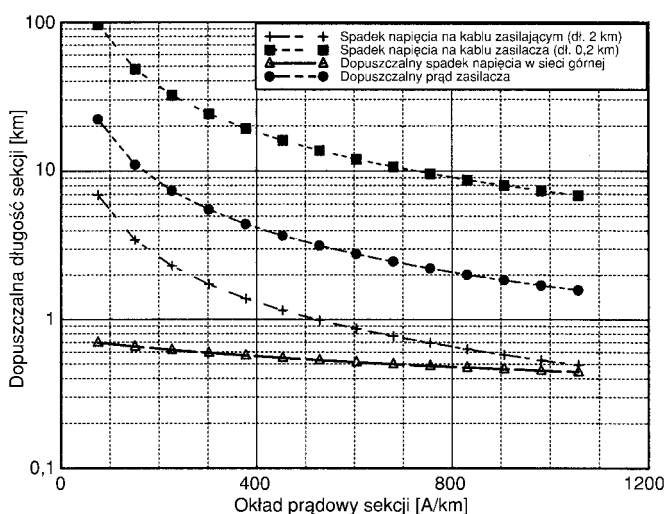
W ten sposób, dla określonych założeń, uzyskano wykresy odzwierciedlające graniczne zdolności przewozowe danego odcinka linii ze względu na parametry układu zasilania. Wykresy te pozwalają również na określenie „wąskich gardeł” zadanej konfiguracji układu zasilania, ze względu na wymagane kryteria projektowe. Podane na rysunkach długości sekcji i kabli powrotnych należy traktować tylko jako szacunkowe, ponieważ odnoszą się one do danych zestawionych przy określonych, upraszczających założeniach. W rzeczywistości sieci powrotne są zwykle rozgałęzione, a kable powrotne rozmieszczone nierównomiernie i mają różne rezystancje. Dlatego też do analiz rozgałęzionych sieci szynowych należy stosować metody uwzględniające nierów-



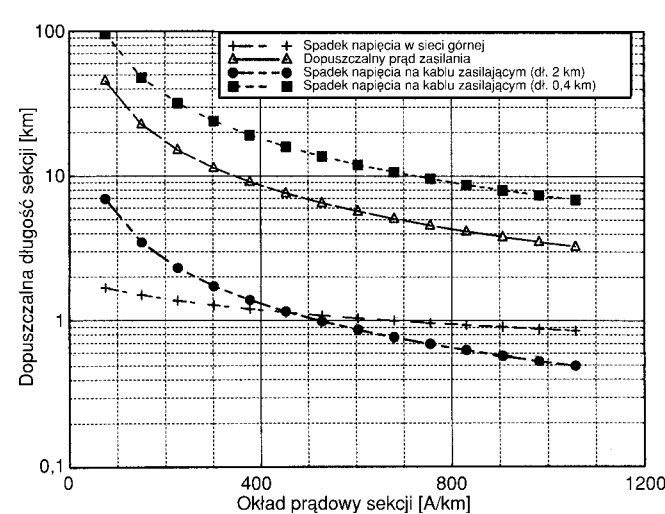
Rys. 8. Dopuszczalna długość sekcji sieci górnej ($v_{kom} = 15 \text{ km/h}$, zasilanie jednostronne)



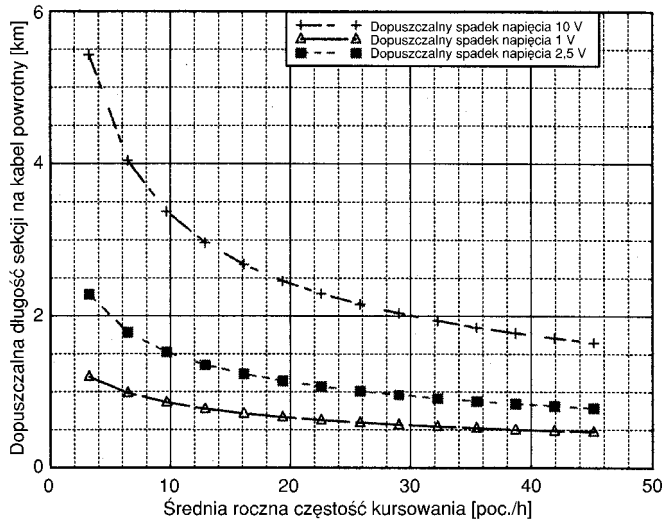
Rys. 9. Dopuszczalna długość sekcji sieci górnej ($v_{kom} = 15 \text{ km/h}$, zasilanie dwustronne)



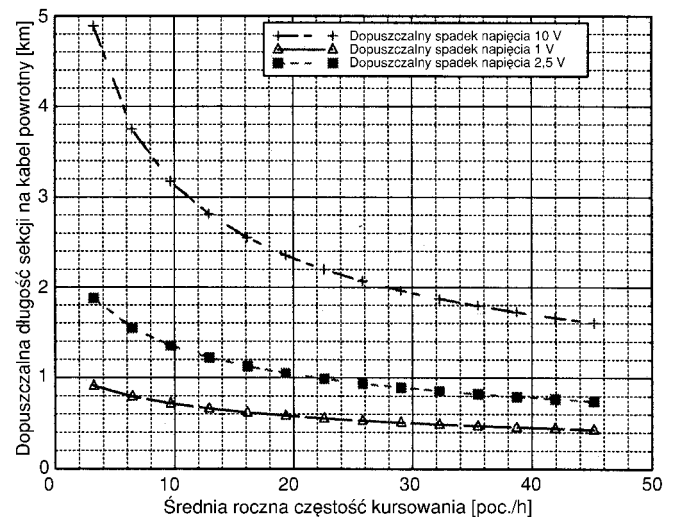
Rys. 10. Dopuszczalna długość sekcji sieci górnej ($v_{kom} = 15 \text{ km/h}$, zasilanie jednostronne)



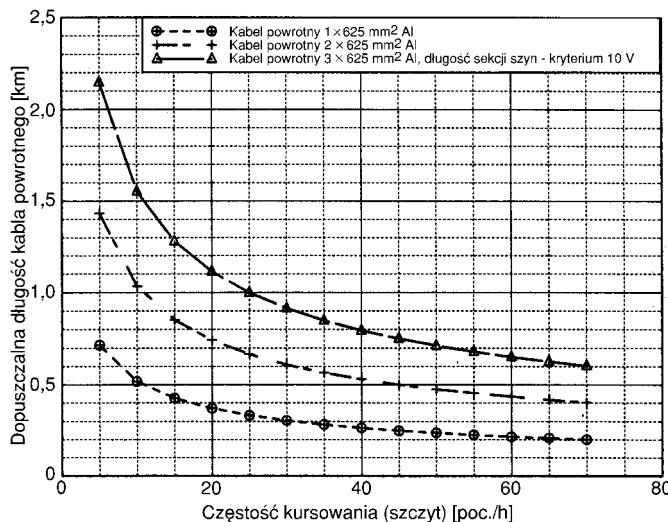
Rys. 11. Dopuszczalna długość sekcji sieci górnej ($v_{kom} = 15 \text{ km/h}$, zasilanie dwustronne)



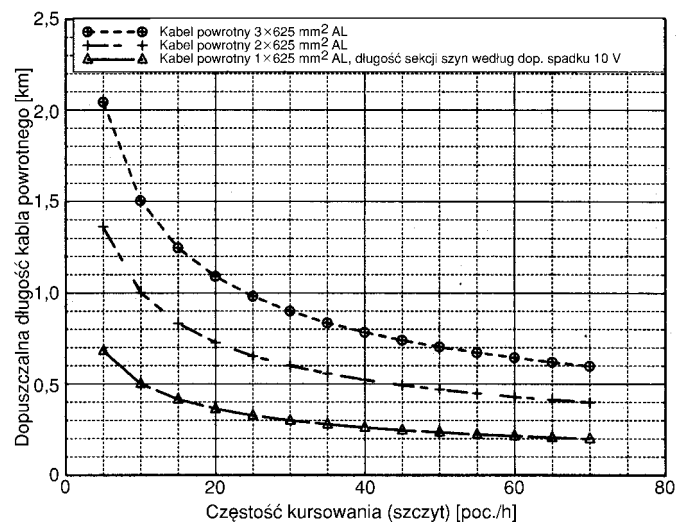
Rys. 12. Dopuszczalna długość sekcji szynowej ze względu na spadek napięcia ($v_{kom} = 15$ km/h)



Rys. 13. Dopuszczalna długość sekcji szynowej ze względu na spadek napięcia ($v_{kom} = 25$ km/h)



Rys. 14. Dopuszczalna długość kabla powrotnego (kryterium: średnie napięcie w godzinie szczytu), $v_{kom} = 15$ km/h



Rys. 15. Dopuszczalna długość kabla powrotnego (kryterium: średnie napięcie w godzinie szczytu), $v_{kom} = 24$ km/h

nomierność ruchu, a co za tym idzie i obciążeń traktacji tramwajowej.

Cechą charakterystyczną metod analitycznych, których zależności matematyczne często „poprawiano” przez wprowadzanie współczynników empirycznych, było ich stosowanie w odniesieniu do warunków przeciętnych obciążeń dla jakich były weryfikowane. Wdrażanie nowej generacji taboru lub gruntowna modernizacja z wymianą wyposażenia układu zasilania wymagały weryfikacji wzorów i współczynników. Charakterystyczne dla okresu stosowania metod analitycznych było to, że każdy z ośrodków projektowych miał zestaw swoich wzorów i współczynników wypracowanych w długoletniej praktyce.

Okres wykorzystywania obliczeniowych metod analitycznych do realizacji w pełnym zakresie projektów i analiz praktycznie minął. Znajomość tych metod i umiejętność po-

sługiwania się nimi wymagała od analityków dużego doświadczenia i obycia z zagadnieniami pomiarów i badań oraz dużego zasobu wiedzy praktycznej. Obecnie metody te wykorzystywane są częściowo do obliczeń wstępnych lub do oszacowań określonych wielkości. Pełne badania i analizy prowadzone są w oparciu o modele symulacyjne [5, 6, 7, 13, 17].

□

Literatura

- [1] Afanasjev S. A., Dołaberidze G.P., Szewczenko W.W.: *Kontaktne i kabieline sieti tramwajew i trolleibusov*. Moskwa, Izd. Transport, 1979.
- [2] Bahra K.S., Catlow R.B.: *Control of stray currents for DC traction systems* – Int. IEE Conf. Electric Railways in a United Europe, 27-30 III 1995, Amsterdam.

- [3] Nene V.: *Advanced propulsion systems for urban rail vehicles*. 1986.
- [4] Delattre D., Seiler W.: *Electrification of an urban transit system*. Revue Generale des Chemins de Fer 7-8/1983, 102e.
- [5] Drążek Z.: *Symulacyjna metoda analizy systemów zasilania elektrycznej trakcji miejskiej prądu stałego*. Rozprawa doktorska, PW 1998.
- [6] Drążek Z.: *Symulacja obciążenia zasilaczy podstacji tramwajowej w rejonach o skomplikowanej konfiguracji sieci*. Przegląd Elektrotechniczny 10-11/1991.
- [7] Drążek Z.: *Kompleksowy macierzowy model obciążenia obszaru zasilania komunikacji tramwajowej*. SEMTRAK'94.
- [8] Dytberner W.: *Uproszczona metoda obliczeń układu zasilania trakcji tramwajowej*. Postępy Napędu Elektrycznego. Warszawa, 1976 (red. J. Podoski).
- [9] Dzikowski J., Kruciński Z.: *Zasilanie trakcji elektrycznej*. Wyd. PŁ 1953.
- [10] Dziuba W.: *Sieć powrotna i prądy błędzące*. Wydawnictwo Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1995.
- [11] Maciołek T., Mierzejewski L., Szelań A.: *Analiza porównawcza zwirników napięciowych w obwodach uszynienia konstrukcji w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, 15–17 IX 1999, Politechnika Wroclawska, Wrocław.
- [12] Kniat L.: *Model matematyczny tramwajowej sieci powrotnej*. Prace IT PW, z. 23/1984.
- [13] Mierzejewski L., Szelań A., Drążek Z.: *Metoda projektowania układów zasilania trakcji tramwajowej – nowelizacja*. RPBR - 9.2.04.03. Warszawa 1987–1990.
- [14] Mierzejewski L., Szelań A., Drążek Z.: *Studium układu zasilania trakcji tramwajowej MZK Warszawa*. 1985–1987.
- [15] Mierzejewski L., Szelań A., Drążek Z.: *Warunki wprowadzenia zasilania dwustronnego w trakcji tramwajowej*. Warszawa 1989.
- [16] Mierzejewski L., Szelań A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Skrypt PW, 1989.
- [17] Mierzejewski L. (kier.) z zespołem: *Niezawodność, dyspozycyjność i oszczędność energii w systemach trakcji elektrycznej dużych aglomeracji miejskich*. Projekt badawczy KBN nr 8 S 502 030 05, IME PW 1993–1996.
- [18] Mierzejewski L., Szelań A. i inni: *Analiza ochrony ziemnozwarciowej i przeciwporażeniowej urządzeń sieci trakcyjnej 3 kV – uszynienia konstrukcji wsporczych*. Praca IME PW na zlec. DG PKP, Warszawa 1994–1995.
- [19] Podoski J.: *Tramwaj szybki – projektowanie i eksploatacja*. WKŁ, Warszawa 1980.
- [20] Mierzejewski L., Szelań A.: *Zagadnienia racjonalizacji zużycia energii elektrycznej w systemie zelektryfikowanego transportu kolejowego*. Technika Transportu Szynowego 5/2001.
- [21] Szczepanik K.: *Zagrożenia korozyjne metalowych konstrukcji podziemnych*. Transport Miejski 7/1987.
- [22] Szelań A.: *Obliczanie tramwajowej sieci powrotnej*. Transport Miejski 2-3/1990.
- [23] Szelań A.: *Obliczanie tramwajowej sieci powrotnej w celu zmniejszenia wpływu z szyn jezdnych prądów błędzących*. TRAM'96, Konferencja Naukowo-Techniczna „Trakcja elektryczna w miastach”, Gdańsk 1996.
- [24] Szelań A.: *Wymiarowanie granicznych zdolności przesyłu energii w sieci zasilającej i powrotnej trakcji tramwajowej*. Konferencja PK SEMTRAK'96, Zakopane, X, 1996.
- [25] Mierzejewski L., Szelań A.: *Układy zasilania zelektryfikowanego transportu miejskiego*. Technika Transportu Szynowego 11/1999.
- [26] Rozenfeld V. E., Isajew I. P., Sidorow N. N.: *Elektriceskaja tiaga*. Moskwa 1962.
- [27] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelań A.: *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej*. Skrypt WPW 1993.
- [28] Drążek Z., Mierzejewski L., Szelań A.: *Obliczenia parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania elektroenergetycznego trakcji tramwajowej metodami analitycznymi (1)*. Technika Transportu Szynowego 7-8/2001.

Autorzy
dr inż. Zbigniew Drążek
dr inż. Leszek Mierzejewski
dr inż. Adam Szelań
Zakład Trakcji
Instytut Maszyn Elektrycznych
Politechnika Warszawska

Bożena Grad

Gospodarka komunalna

Kierunki zmian w zarządzaniu transportem publicznym

- Wpływ transformacji polityczno-gospodarczej na funkcjonowanie gospodarki komunalnej w samorządzie
- Działalność gminy w gospodarce komunalnej
- Kierunki zmian w zarządzaniu transportem miejskim
- Prywatyzacja w transporcie pasażerskim – rozwiązania prawne i kierunki zmian

Sprzedaż wysyłkową prowadzi:
EMI-PRESS
90-955 Łódź 8, skr. poczt. 103
tel./fax (0-42) 633 37 51

110 stron, format A5, cena 15 z³