technika

Metoda symulacyjna obliczania obciążeń sieci tramwajowej

W poprzednich artykułach dotyczących metod obliczeń obciążeń energetycznych systemów zelektryfikowanego transportu miejskiego (tts 7-8 [6], tts 9 [9]) autorzy przedstawili metody analityczne, które stosowane były przy założeniu szeregu uproszczeń i w odniesieniu do warunków średnich ruchu pojazdów. Niniejszy artykuł prezentuje współczesne metody z zastosowaniem technik modelowania i symulacji wykorzystywane do analiz warunków funkcjonowania elektroenergetyki trakcji miejskiej prowadzonych przy projektowaniu nowych systemów transportowych czy modernizacji istniejących linii.

Głównym celem metod symulacyjnych stosowanych w analizie obciążeń elektrotrakcyjnych systemu transportu miejskiego jest jak najdokładniejsze odzwierciedlenie warunków obciążenia układu zasilania, przy założeniu, że konfiguracja układu zasilania oraz sposób organizacji i wielkość ruchu mogą być dowolne, oczywiście w zakresie realnych warunków funkcjonowania systemu. W przypadku trakcji szynowej, ze względu na zagrożenie od prądów błądzących, bardzo istotne jest uwzględnianie różnic potencjałów punktów powrotnych, co jest pomijane i stanowi daleko idące uproszczenie w metodach analitycznych. Opracowywane programy symulacyjne oparte są zwykle na modelu deterministycznym, aczkolwiek niektóre jego podsystemy (np. organizacja ruchu) mają charakter modeli stochastycznych [4, 6, 7, 11, 12, 14, 15, 17, 22]. Tramwaje w rozgałęzionym rejonie zasilania poruszają się po różnych trasach i przy występowaniu zakłóceń (sygnalizacja świetlna, skrzyżowania, zwolnienia nieplanowe), co powoduje zmiany następstw w potokach pojazdów na poszczególnych odcinkach i konieczność kolejkowania potoków pojazdów w miejscach rozjazdów (węzłach) sieci transportowej.

Podstawę programu symulacyjnego, opracowanego w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej, stanowi zaadaptowana metoda analizy schematów chwilowych [1], z wykorzystaniem metody sieciowej potencjałów węzłowych w opisie macierzowym [2], uwzględniającej w rozpływie prądów wszystkie tramwaje pobierające lub zwracające (hamowanie odzyskowe) do sieci energię. Model symulacyjny jest modelem dyskretnym o kroku czasowym Δt. Chwilowe schematy zastępcze układu zasilania z pojazdami zastępowanymi źródłami prądowymi o obciążeniach wynikających z charakterystyk $I_i(v_i)$, gdzie I_i – jest prądem i-tego pociągu, a v_i jest odpowiednio prędkością i-tego pociągu, tworzone są dla każdego kolejnego kroku obliczeniowego. Rezystancje wewnętrzne i napięcia źródłowe podstacji zastępowane są w schematach przez źródła prądowe [1, 4, 11, 15, 22]. Do uzyskania efektywnych rozwiązań oraz zadowalającej dokładności opisu badanych przebiegów wymagane jest, aby krok czasowy Δt spełniał warunek:

$$\Delta t << \tau_{em}$$

gdzie τ_{em} jest najmniejszą stałą czasową elektromechaniczną pojazdu.

Spełnienie tego warunku pozwala na pominięcie w obwodzie indukcyjności sieci trakcyjnej i podstacji trakcyjnej i podstacji bez istotnego wpływu na jakość rozwiązań [1, 11].

Równanie metody potencjałów węzłowych [2] ma postać:

$$\mathbf{YV} = \mathbf{I} \qquad (1)$$

gdzie:

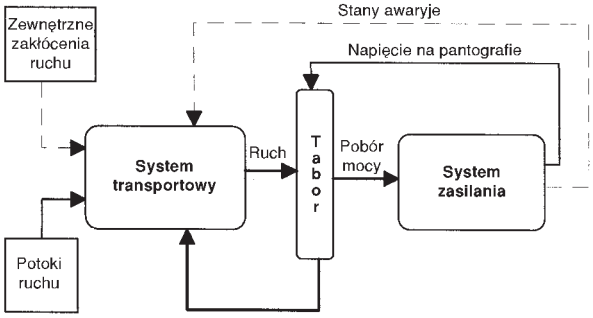
- $\mathbf{I}$ – macierz prądów węzłowych (utworzony w oparciu o prądy pobierane przez pojazdy);
- $\mathbf{V}$ – wektor niewiadomych, n-elementowy wektor potencjałów węzłowych;
- $\mathbf{Y}(nxn)$ – macierz współczynników (admitancje węzłowe, będące przy wprowadzonym uproszczeniu obwodu konduktancjami G – schemat zastępczy zawiera tylko rezystancje), zaś n – aktualną liczbą węzłów dla każdego kroku czasowego o przedziale Δt.

Przyjęcie omówionych założeń metodologicznych pozwala na przybliżenie wyników symulacji obciążeń do rzeczywistego stanu rozpływów prądów i spadków napięć w obwodzie zasilania (metoda schematów chwilowych) przy znacznym uproszczeniu algorytmu obliczeń (metoda potencjałów węzłowych).

Na rysunku 1 przedstawiono schemat wzajemnego oddziaływania podsystemów składających się na ogólny system komunikacji miejskiej. Przez system transportowy określono tu infrastrukturę: przebieg tras poszczególnych linii komunikacyjnych, sygnalizację, lokalizacje przystanków. System zasilania określa zbiór rejonów zasilania obsługiwanych przez poszczególne podstacje trakcyjne i wszystkie parametry elektryczne układów do analizy w zakresie prądów trakcyjnych. W zasilaniu elektroenergetycznym uwzględnia się zakłócenia, takie jak: wahania napięcia po stronie prądu zmiennego w podstacjach trakcyjnych i ewentualne stany awaryjne. System taboru jest ściśle powiązany z systemem zasilania poprzez charakterystyki poboru prądu i poziomy

napięć na pantografach oraz z systemem transportowym poprzez narzucone przebiegi tras, sygnalizację świetlną, sieć przystanków itp. W systemie taboru uwzględniane jest wzajemne oddziaływanie ruchowe poszczególnych pojazdów (np. konieczność podhamowania przed pojazdem poprzedzającym, wpływ poboru prądu wszystkich tramwajów na poziom napięcia na pantografie każdego z nich). Realizacja potoków ruchu może odbywać się z zadanym (deklarowanym) rozkładem jazdy lub generowanym na podstawie przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa. System transportowy może być zakłócany czynnikami zewnętrznymi, jak np. innymi systemami komunikacyjnymi występującymi w aglomeracji.

Na rysunku 1 liniami przerywanymi oznaczone zostały uwarunkowania opcjonalnie uwzględnione w opracowanym modelu symulacyjnym TRAM [22].



Rys. 1. Schemat systemu komunikacji miejskiej – powiązania systemu transportowego z systemem zasilania

Realizacja modeli podsystemów – struktura danych

Z punktu widzenia systemu transportowego symulowany obszar jest zbiorem:

- tras tramwajowych rozpoczynających się od węzłów brzegowych,
- zbiorem przystanków,
- miejsc rozmieszczenia sygnalizacji świetlnej wzdłuż poszczególnych tras,
- skrzyżowań i rozjazdów.

Z punktu widzenia systemu zasilania symulowany obszar jest zbiorem:

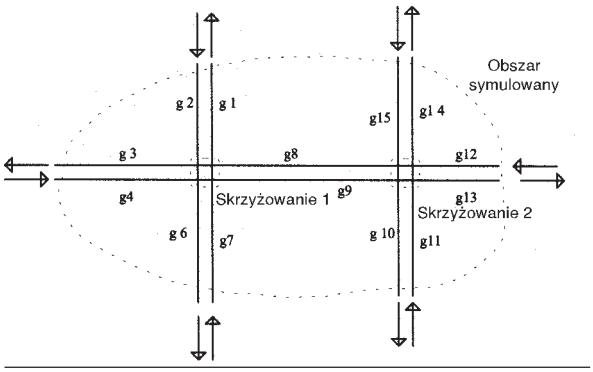
- podstacji trakcyjnych,
- kabli zasilających,
- gałęzi ruchu, którym przyporządkowane są parametry sieci.

Całość systemu uzupełniają pociągi tramwajowe z narzuconym sposobem prowadzenia ruchu.

Gałęzie ruchu

Z uwagi na konieczność równoległego rozwiązywania zagadnień ruchowych oraz elektrycznych wprowadzony został uniwersalny podział układu dróg tramwajowych na gałęzie ruchu i przyporządkowane im gałęzie elektryczne.

Przez gałąź ruchu rozumie się jednokierunkowy odcinek drogi tramwajowej (jeden tor), rozpoczynający się w umownym punkcie środka rozjazdu (skrzyżowania), z którego kierunek ruchu jest od skrzyżowania, a kończący się na kolejnym rozjeździe. Początkiem gałęzi ruchu może też być punkt wjazdu (brzeg) do systemu, a końcem – punkt wyjazdu z obszaru symulowanego (rys. 2).



Rys. 2. Przykład podziału analizowanego obszaru na gałęzie ruchu

Z punktu widzenia sieci zasilającej podział taki ma uzasadnienie, ponieważ w większości przypadków w sieciach górnych występują mieszane typy sekcjonowania – wzdłużne i poprzeczne, więc przyporządkowanie tych samych węzłów obwodu elektrycznego sąsiednim gałęziom jednoznacznie określa fragmenty wspólnej bieżni sieci górnej lub brak sekcjonowania poprzecznego obu kierunków ruchu.

Podział symulowanego obszaru na gałęzie ruchu zawiera w programie symulacyjnym tablica GAL.

Pojazd

Pojazd identyfikowany jest poprzez numer pojazdu i dodatkowo gałąź ruchu, na której się aktualnie znajduje.

„Status" pojazdu określa fazę jazdy i wyróżnia:

– hamowanie przed poprzednikiem,
– hamowanie do ograniczenia prędkości,
– hamowanie do strefy skrzyżowania,
– hamowanie do sygnalizatora,
– hamowanie do przystanku,
– postój na przystanku,
– postój przed sygnalizatorem,
– postój przed strefą skrzyżowania,
– postój przed poprzednikiem,
– wybieg,
– wybieg po hamowaniu za poprzednikiem,
– jazda z poborem energii.

Trasa

Macierz TRASA opisuje kolejność gałęzi ruchu tworzących dwutorową linię tramwajową. Jednej linii tramwajowej przypadają więc dwie „trasy" (tam i powrót).

Prędkość dopuszczalna

Prędkość maksymalną obowiązującą w danym punkcie drogi określa tablica VMAX.

Profil poziomy i pionowy

Sumaryczny profil poziomy i pionowy trasy podawany jest w tablicy PRO poprzez deklaracje kolejnych zmian profilu w funkcji drogi.

Zatrzymania

Tablica ZAT jest listą bezwarunkowych i warunkowych zatrzymań uszeregowanych wzdłuż poszczególnych gałęzi ruchu.

„Typ zatrzymania" określa jeden z czterech rozróżnianych przez program wariantów:

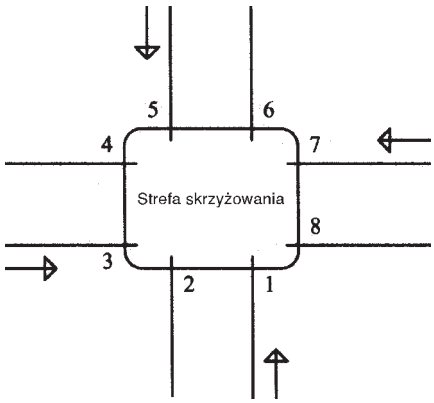
1) przystanek,
2) sygnalizator,
3) strefa skrzyżowania,
4) sygnalizator na wjeździe do umownej strefy skrzyżowania (stop podwójnie uwarunkowany).

Sygnalizacja świetlna

Praca sygnalizacji świetlnej może w sposób znaczący wpływać na wielkość obciążeń trakcyjnych poprzez spiętrzenia ruchu i dodatkowe rozruchy pojazdów. Parametry cyklu pracy sygnalizatorów oraz ich lokalizacja opisane są w tablicy SYG.

Rozjazdy

Każde skrzyżowanie (linii tramwajowych) traktowane jest jako obiekt z przypisanymi czterema wejściami i czterema wyjściami, co pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Reprezentacja skrzyżowania

W programie symulacyjnym skrzyżowania reprezentowane są tablicą KRZYZ.

Niektóre wejścia („zaciski") rozjazdów mogą pozostać nie podłączone, tak jak w przypadku skrzyżowania typu T, wymagane jest tylko przestrzeganie numerów wejść.

Przejazd przez strefę skrzyżowania danego pojazdu może (ale nie musi) spowodować konieczność wstrzymania ruchu innych pojazdów zbliżających się do skrzyżowania Algorytm sprawdza przejezdność skrzyżowania dla *i*-tego tramwaju.

Następstwo ruchu

Organizacja ruchu, a więc następstwo tramwajów poruszających się po poszczególnych gałęziach ruchu oraz ich liczebność, reprezentowane są tablicami RUCH oraz IND.

Rozkład jazdy i generacja potoków ruchu

Rozkład jazdy przyporządkowany jest każdej gałęzi wejściowej (bramie) symulowanego obszaru. Odbywa się to za sprawą tablicy ROZKLAD, przechowującej w każdym wierszu informacje dotyczące jednego generowanego na wjeździe do systemu pojazdu.

Na początku każdej z gałęzi wejściowych program generuje strumień zgłoszeń pociągów tramwajowych o losowej liczbie wagonów, losowej masie całkowitej i losowej prędkości początkowej. Prędkość początkowa i masa wyznaczane są z rozkładu normalnego z zadanym odchyleniem standardowym wokół zadanej średniej prędkości (masy). Przyjmuje się [9], że prawdopodobieństwo pojawienia się na wejściu do rejonu podstacji *k* tramwajów w jednostce czasu można określić ze wzoru wyrażającego rozkład Poissona:

$$Pk = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}$$

gdzie:

λ – średnia liczba tramwajów przybywających w okresie obserwacji.

Strumieniowi zgłoszeń o rozkładzie Poissona odpowiada [9] wykładniczy rozkład czasów oczekiwania między poszczególnymi zgłoszeniami:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 - e^{-\lambda \cdot t} & t > 0 \end{cases}$$

gdzie:

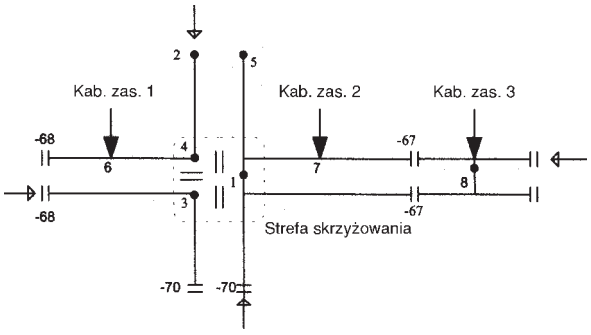
λ^{-1} – wartość średnia odstępu czasu między zgłoszeniami.

Model symulacyjny może działać również dla zdeterminowanego rozkładu jazdy.

Parametry elektryczne sieci zasilającej

Rezystancje jednostkowe sieci górnej oraz sposób jej sekcjonowania podawany jest w tablicy SG, zaś rezystancje jednostkowe szyn jezdnych podawane są w tablicy SD.

Zbiór węzłów elektrycznych danej gałęzi powinien zaczynać się i kończyć węzłem zlokalizowanym na początku i na końcu gałęzi. Przykład numeracji węzłów sieci górnej według przedstawionego algorytmu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Ilustracja metodologii oznaczania węzłów

Procedura generująca macierz admitancyjną uzupełnia zbiór węzłów stałych sieci zasilającej dynamicznie tworzonymi i numerowanymi węzłami ruchomymi, z których para przyporządkowana jest każdemu pojazdowi obecnemu w obszarze symulacji.

Sieć kablowa i podstacje

Sieć kablowa i podstacje trakcyjne reprezentowane przez odpowiednie numery węzłów topologii układu i rezystancje opisane są tablicami KAB i POD.

Szkic algorytmu programu symulacyjnego

Program symulacyjny TRAM został napisany w języku MATLABa [18, 19, 20, 21].

Uproszczony schemat algorytmu opracowanego programu symulacyjnego TRAM pokazano na rysunkach 5 i 6.

Start programu rozpoczyna się od wczytania danych dotyczących konfiguracji sieci ruchu i sieci elektrycznej układu zasilania – rysunek 5.

Następnie wczytywane jest początkowe zapełnienie systemu tak, by w początkowej fazie symulacji sieć zasilająca była obciążona.

Kolejnym etapem jest zadanie parametrów symulacji, czyli czasu jej trwania i kroku analizy oraz kroku zapisu na dysk. Przyjęcie małego kroku analizy powinno iść w parze z małym krokiem zapisu na dysk.

Dla początkowo obecnych w systemie pojazdów tworzone są tablice RUCH, IND, organizujące ruch w poszczególnych gałęziach, oraz wyznaczane są najbliższe przeszkody na drodze poszczególnych pojazdów.

Właściwa symulacja (rys. 6) otwierana jest główną pętlą symulacyjną, kroku czasowego Δt.

Dla tramwajów ze statusem pozwalającym na pobór prądu wyznaczany jest prąd z charakterystyki $I(v)$ i realizowana jest pętla iteracyjna obliczenia rozpływu prądu w obwodzie zasilania. Następna wewnętrzna pętla iteracyjna dotyczy obliczeń trakcyjnych: siły, przyspieszenia, prędkości, położenia i przebytej drogi każdego z pociągów tramwajowych.

Pojawiający się według rozkładu jazdy lub wygenerowany nowy pojazd w obszarze zasilania reprezentowany jest dwoma węzłami „ruchomymi", które przypisywane są w bieżącym kroku generacji do macierzy konduktancyjnej, przez co jej wymiar ulega zmianie, w zależności od liczby pociągów w systemie.

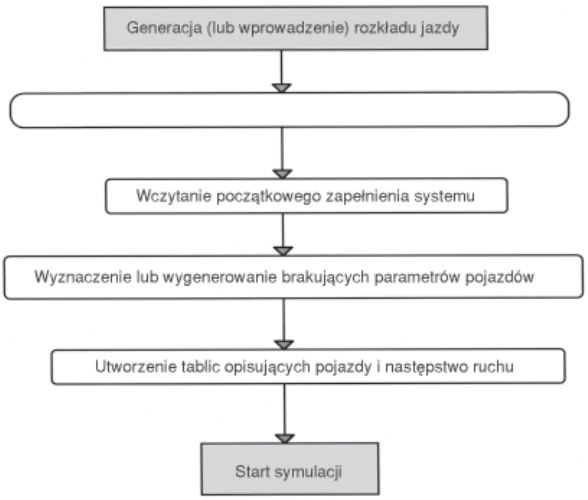
Ruch pojazdów w symulowanym rejonie odzwierciedlany jest w macierzy konduktancyjnej poprzez zmianę:

- wartości konduktancji gałęzi elektrycznych między każdymi dwoma sąsiednimi węzłami, z których co najmniej jeden jest węzłem ruchomym, a więc reprezentuje pantograf pojazdu (rys. 7);
- konfiguracji sieci elektrycznej dla każdej zmiany kolejności pojazdów w gałęzi sieci ruchu.

Zmiany konfiguracji sieci w kroku obliczeniowym, budowa macierzy węzłowych

W trakcie symulacji mogą mieć miejsce następujące zmiany w konfiguracji macierzy konduktancyjnej wywołane:

- wjazdem do rejonu symulacji (generacją) nowego pojazdu (rozszerzenie macierzy);
- opuszczeniem przez pojazd symulowanego rejonu (wykreślenie węzłów reprezentujących pojazd z macierzy);
- minięciem przez pojazd węzła stałego (węzeł ruchomy).



Rys. 5. Przygotowanie danych do symulacji

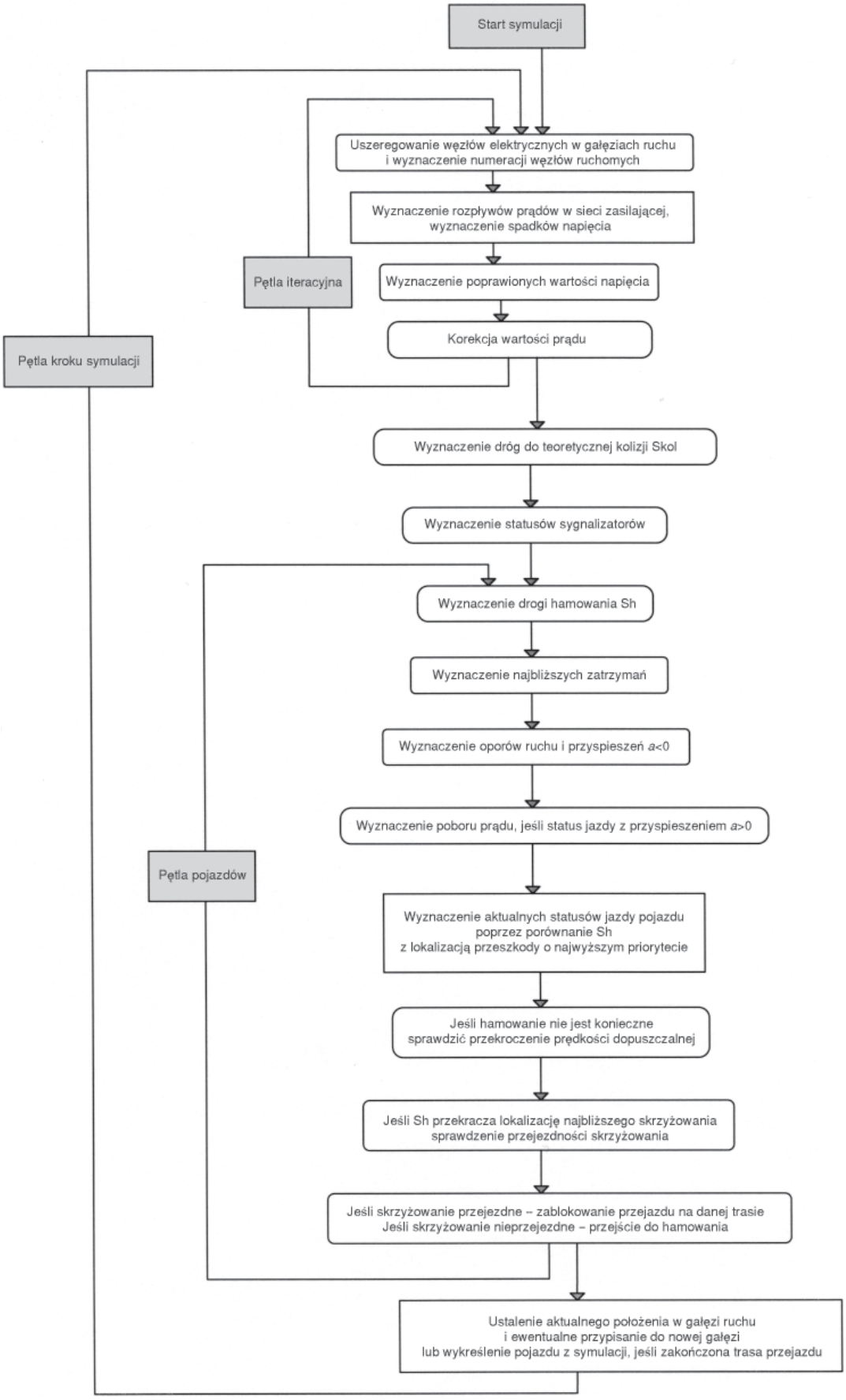
Ruch pojazdu wzdłuż gałęzi ruchu prowadzony jest według następującej hierarchii zadań:

- uniknąć kolizji z poprzednikiem;
- realizować bezwzględnie zatrzymania na wszystkich przystankach wzdłuż trasy;
- realizować zatrzymanie przed sygnalizatorem, jeśli wyświetla on sygnał stop, a przyspieszenie hamowania nie przekroczyłoby wartości maksymalnej;
- realizować zatrzymanie przed strefą skrzyżowania, jeśli realizowana trasa jest na tym skrzyżowaniu zablokowana;
- ograniczać prędkość w razie zbliżania się do punktu zadania nowej wartości prędkości dopuszczalnej, mniejszej od wartości poprzedniej i reagować: hamowaniem, jeśli różnica prędkości pojazdu i prędkości dopuszczalnej przekracza 2 m/s lub wybiegiem, jeśli hamowanie nie jest niezbędne;
- w przypadku postoju na przystanku, przed którym ustawiony jest sygnalizator, rozpoczynać jazdę nie wcześniej niż po ukończeniu zadanego czasu obsługi pasażerów, a nie później niż kolejne otwarcie sygnalizatora (jeśli pozwalają na to warunki ruchu przed pojazdem);
- w przypadku postoju przed strefą skrzyżowania, przed którą ustawiony jest sygnalizator i przy zablokowanym przejeździe, wznawiać jazdę tylko wtedy, gdy sygnalizator wyświetla sygnał zezwalający;
- w przypadku wystąpienia trzech rodzajów zatrzymań w jednym miejscu drogi (przystanek, sygnalizator, zablokowany przejazd) postępować jak w dwóch poprzednich przypadkach, jednocześnie;
- zatrzymanie przed poprzednikiem (spiętrzenie ruchu) nie „zwalnia" od zatrzymania na najbliższym przystanku.

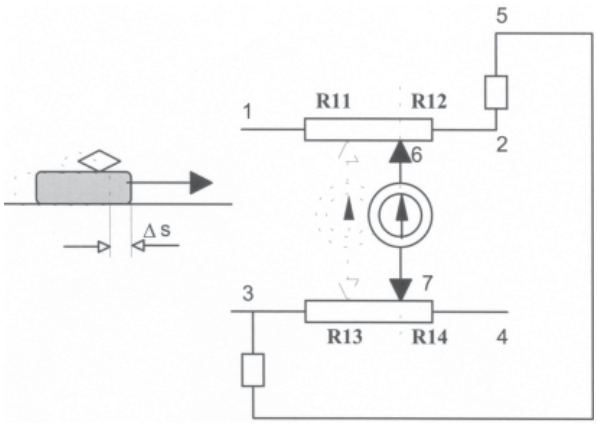
W każdym kroku analizy modyfikowane są wielkości charakteryzujące stan każdego pojazdu:

- faza jazdy (status),
- położenie (ofset) i prędkość modyfikowane według:

$$\begin{cases} v_{i(t_{sym}+1)} = v_{i(t_{sym})} + a_{i(t_{sym}+1)}\Delta t \\ s_{i(t_{sym}+1)} = s_{i(t_{sym})} + (v_{i(t_{sym})} + v_{i(t_{sym}+1)})\dfrac{\Delta t}{2} \end{cases} \quad (2)$$



Rys. 6. Uproszczony schemat algorytmu symulacji



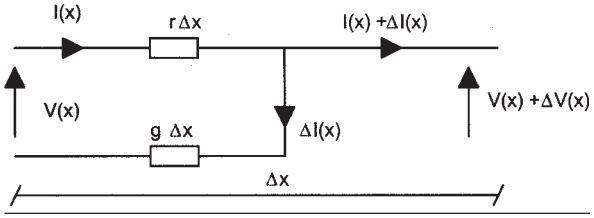
Rys. 7. Zmiany wartości rezystancji sieci w gałęziach od węzła ruchomego do dwóch sąsiednich węzłów na skutek ruchu pojazdu

W wyniku symulacji tworzone są zbiory z zapisem prądów wszystkich zadeklarowanych kabli zasilających i powrotnych oraz zbiory dodatkowe z zapisem zmiennych ruchu pojazdów o wybranych przez użytkownika numerach. Zapis taki dotyczy chwil czasowych odległych o Δt i w takim znaczeniu są to wartości chwilowe.

Powyższe wyniki są przeliczane przez programy pomocnicze, wyznaczające wartości średnie i średniokwadratowe za zadane przedziały czasu i wybierające wartości maksymalne oraz dokonujące obróki statystycznej wyników. Zbiory wynikowe programu symulacyjnego mają standardowy format i mogą być opracowywane również przez dowolne programy do obróbki danych, np. arkusze kalkulacyjne.

Uwzględnienie upływu prądów błądzących w modelu sieci powrotnej

Struktury danych oraz algorytm przyjęty w modelu symulacyjnym pozwala na analizę prądów błądzących [15] przy założeniu ciągłego rozkładu upływności z szyn wzdłuż torowiska i homogeniczności ziemi jako przewodnika, co schematycznie pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat prądów błądzących

Rozwiązanie układu równań liniowych. Macierze rzadkie

Rozkład macierzy na czynniki – faktoryzacja

W celu uzyskania wyników w postaci chwilowych prądów w poszczególnych gałęziach obwodu w każdym kroku obliczeniowym należy rozwiązywać układ równań liniowych wysokiego rzędu, z uwagi na dużą liczbę węzłów elektrycznych w sieci układu zasilania. Czas rozwiązania układu tych równań jest uzależniony od liczby n (rząd układu) równań. W programie symulacyjnym realizowane jest to przy zastosowaniu algorytmu rozkładu $\mathbf{LU}$, będącego odmianą metody eliminacji Gaussa; obie te metody należą do klasy metod numerycznych skończonych [2,10,17,19].

Podstawowa metoda eliminacji Gaussa [2], z wyborem elementów podstawowych, służy do rozwiązania układu równań liniowych postaci:

$$\mathbf{A}x = y \tag{3}$$

gdzie:
$\mathbf{A}$ – jest macierzą współczynników układu równań.

Jednym z podstawowych rozkładów macierzy $\mathbf{A}$ jest rozkład na macierze trójkątne przez przekształcenie jednostronne, czyli faktoryzacja jednostronna.

W wyniku tego rozkładu otrzymuje się postać macierzy $\mathbf{A}$ jako iloczyn dwóch macierzy trójkątnych – dolnej $\mathbf{L}$ i górnej $\mathbf{U}$.

$$\mathbf{A} = \mathbf{LU} \tag{4}$$

a układ równań można zapisać:

$$\mathbf{A}x = \mathbf{LU}x = y \tag{5}$$

Procedura rozkładu $\mathbf{LU}$ jest wykorzystywana przez kod źródłowy programu w algorytmie rozwiązania równania metody potencjałów węzłowych.

Praktyczne ograniczenia metody symulacji układów zasilania trakcji miejskiej

W przypadku trakcji tramwajowej miejskiej macierz współczynników $\mathbf{Y}$ jest bardziej wypełniona w porównaniu do innych układów zasilania, np. metra, a to ze względu na skrzyżowania i stosowane sekcjonowania: poprzeczne i wzdłużne [22]. Jednak nawet w tym przypadku stopień wypełnienia macierzy jest na tyle niski, że w procedurze obliczenia rozpływu prądów w układzie zasilania celowe jest stosowanie rachunku na macierzach rzadkich. Przez stopień wypełnienia macierzy rozumie się tu współczynnik d w równaniu:

$$n_z = n^2 \cdot d \tag{6}$$

gdzie:
n_z – liczba elementów zerowych w macierzy $\mathbf{Y}$ rzędu n.

Innym poważnym ograniczeniem w stosowaniu metod symulacyjnych jest liczba węzłów sieci modelu układu zasilania systemu komunikacji tramwajowej. Duża liczba węzłów oznacza układy równań wysokiego rzędu i przez to znaczne wydłużenie czasu obliczeń, a przede wszystkim zajętość pamięci komputera prowadzącą w skrajnych przypadkach do braku możliwości realizacji zadania.

W przypadku prezentowanej metody symulacji zmniejsza się zajętość pamięci przez rozdział węzłów stałych (stacjonarnych) od węzłów ruchomych, czyli lokalizacji pantografów pojazdów, co umożliwia znacznie szybsze kolejne rozwiązania dla tej samej struktury sieci przy zmieniających się wartościach współczynników macierzy $\mathbf{Y}$ (zmienne położenia pojazdów) i zmieniających się wartościach wektora $\mathbf{I}$ (zmienne wartości prądów pojazdów).

Procedury rozwiązujące układy równań z rzadką strukturą macierzy współczynników bazują na takim algorytmie reprezentacji macierzy współczynników $\mathbf{Y}$, aby w pamięci komputera przechowywane były tylko elementy niezerowe.

Badania symulacyjne miejskiego systemu zasilania trakcji tramwajowej

W celu przedstawienia możliwości programu symulacyjnego TRAM [22], przedstawiono wyniki symulacji obciążeń energetycznych sieci kablowej w rejonie zasilania jednej z podstacji tramwajowych Tramwajów Warszawskich, oznaczonej jako *PT*.

Rejon zasilania podstacji *PT* obejmuje swym obszarem trzy odcinki ruchu tramwajowego zbiegające do jednego skrzyżowania.

Plan sytuacyjny rejonu zasilania podstacji przedstawiono na rysunku 9. Odległości między punktami charakterystycznymi sieci zasilającej podane są w metrach.

Ruch w tym rejonie prowadzony jest po torowiskach wydzielonych, z wyjątkiem odcinka między izolatorem sekcyjnym nr 64 a skrzyżowaniem. Lokalizację sygnalizatorów świetlnych oraz przystanków podano na planie sytuacyjnym (rys. 10), zaznaczając odległości w metrach w kierunku do najbliższego izolatora sekcyjnego lub najbliższego miejsca postoju.

Lokalizacje obiektów rozpoznawalnych przez model symulacyjny przepisano tak, by zorientowane były względem początków gałęzi ruchu, do których są przypisane (rys. 11). Numerację węzłów sieci górnej zamieszczono na rysunku 12, a numerację węzłów sieci dolnej na rysunku 13. Przykład zadeklarowania tablicy zatrzymań zawiera tablica 2.

W całym rejonie podstacji *PT* zainstalowana jest sieć jezdna wielokrotna, poza strefą skrzyżowania, gdzie jest sieć płaska. W całym rejonie zasilania w torach zainstalowano szyny rowkowe.

Wyniki obliczeń symulacyjnych

Obciążenia zasilaczy i podstacji

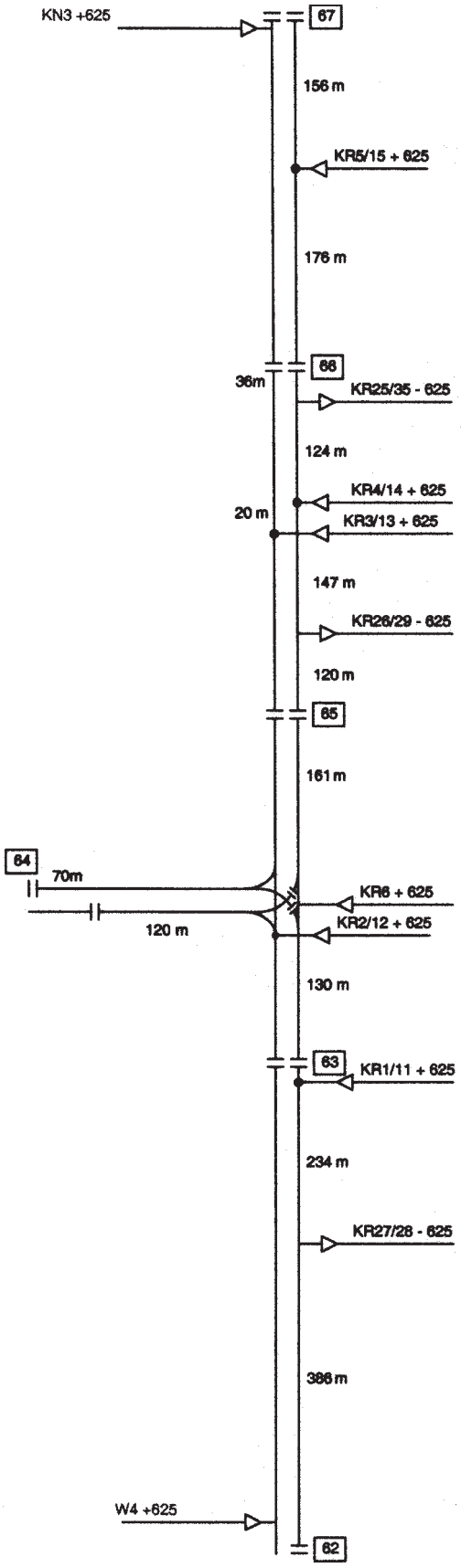
Przeprowadzono symulacje 1 godziny ruchu szczytowego oraz $^1/_2$ godziny ruchu pozaszczytowego.

Rozkład jazdy był przyjmowany jako zdeterminowany, określony z dokładnością do 1 min i odpowiadał warunkom natężenia ruchu w dniu rejestracji weryfikacyjnej.

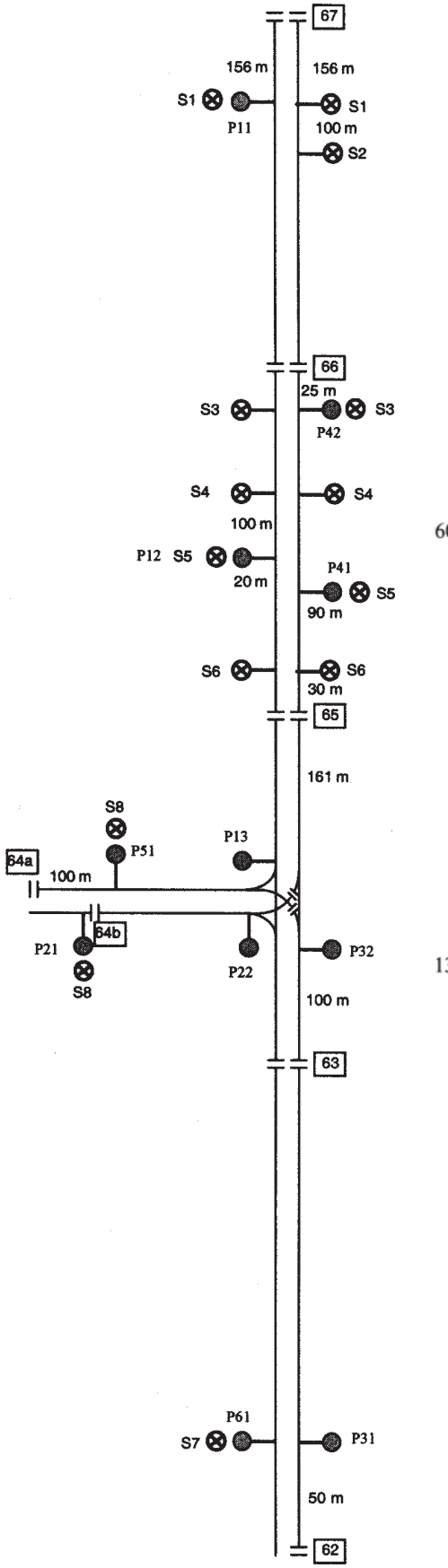
Tablica 1

Dane kabli zasilających i powrotnych

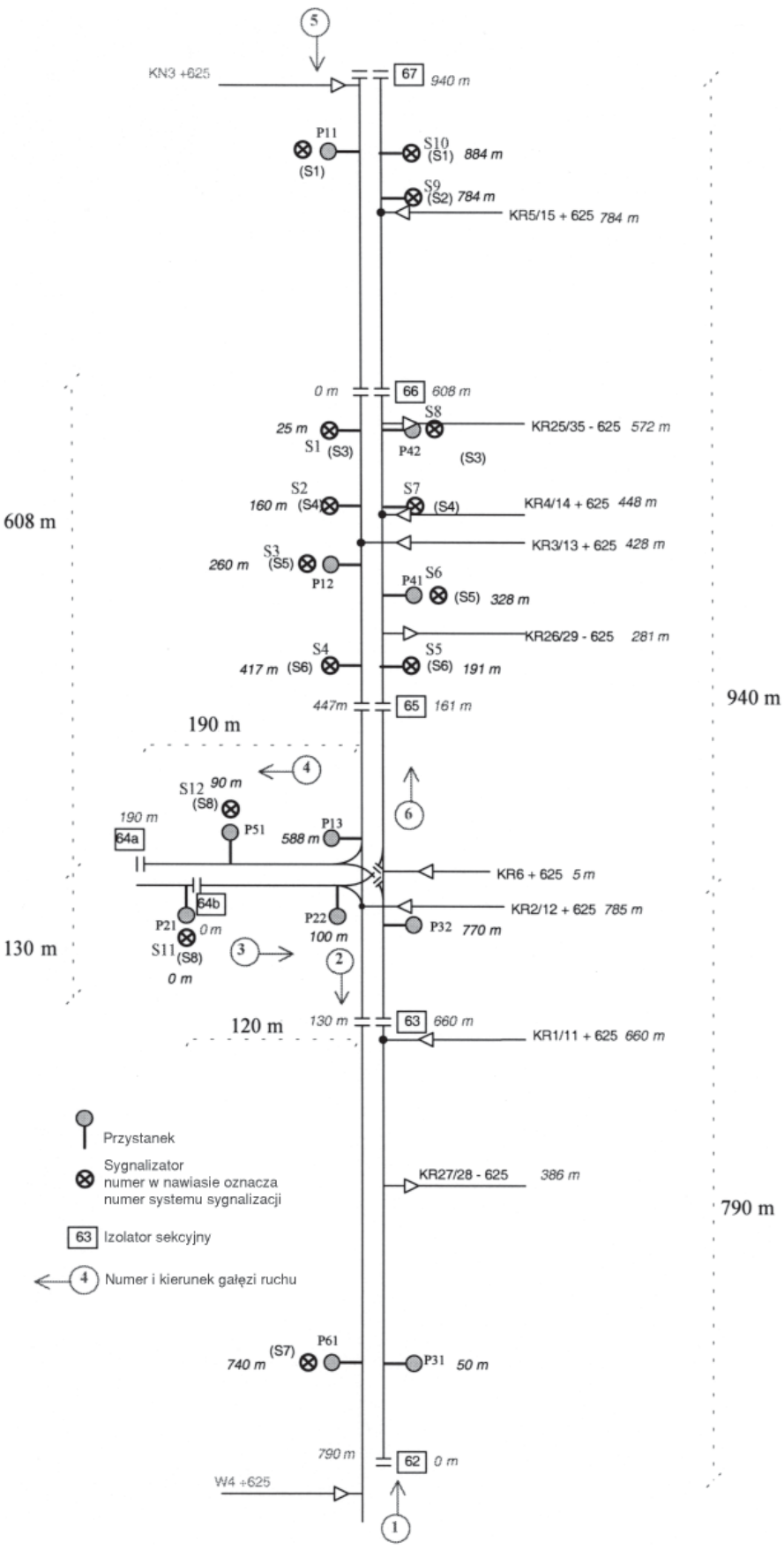
Nazwa kabla (oznaczenie)	Przekrój [mm²]	Liczba kabli razem	Długość [m]	Rezystancja [Ω]
K1/11	625	2	970	0,023280
K2/12	625	2	960	0,023040
K3/13	625	2	350	0,008400
K4/14	625	2	380	0,009120
K5/15	625	2	760	0,018240
K6	625	1	750	0,036000
K25/35	625	2	530	0,012720
K26/29	625	2	670	0,016080
K27/28	625	2	1202	0,028848



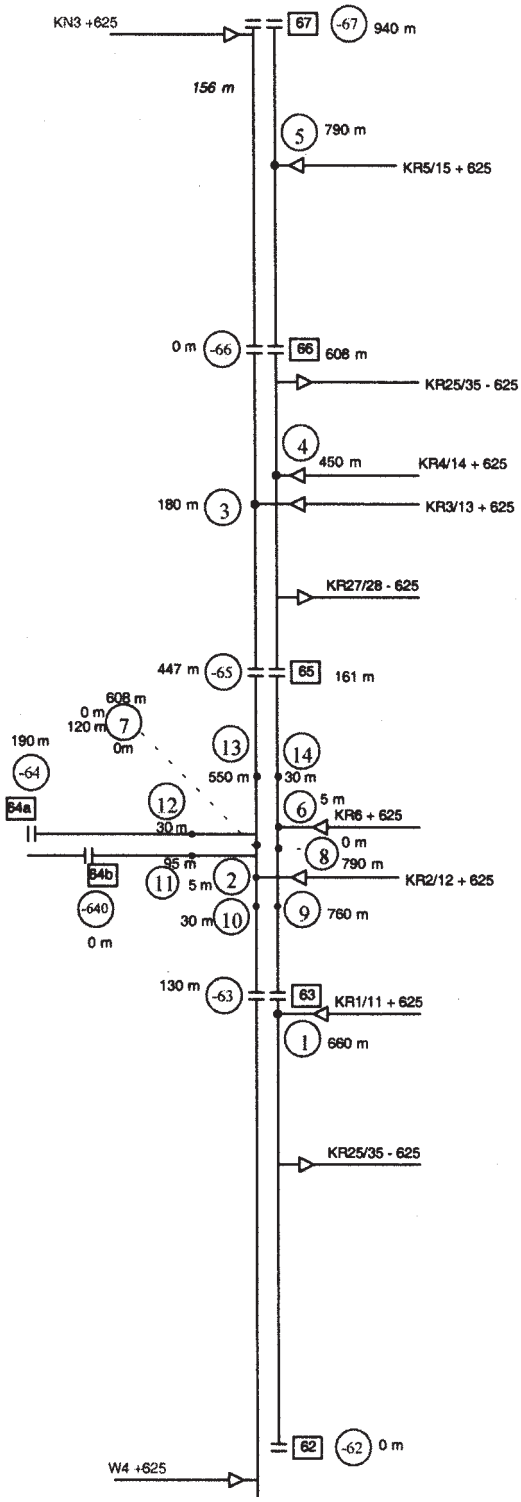
Rys. 9. Plan rejonu zasilania podstacji PT



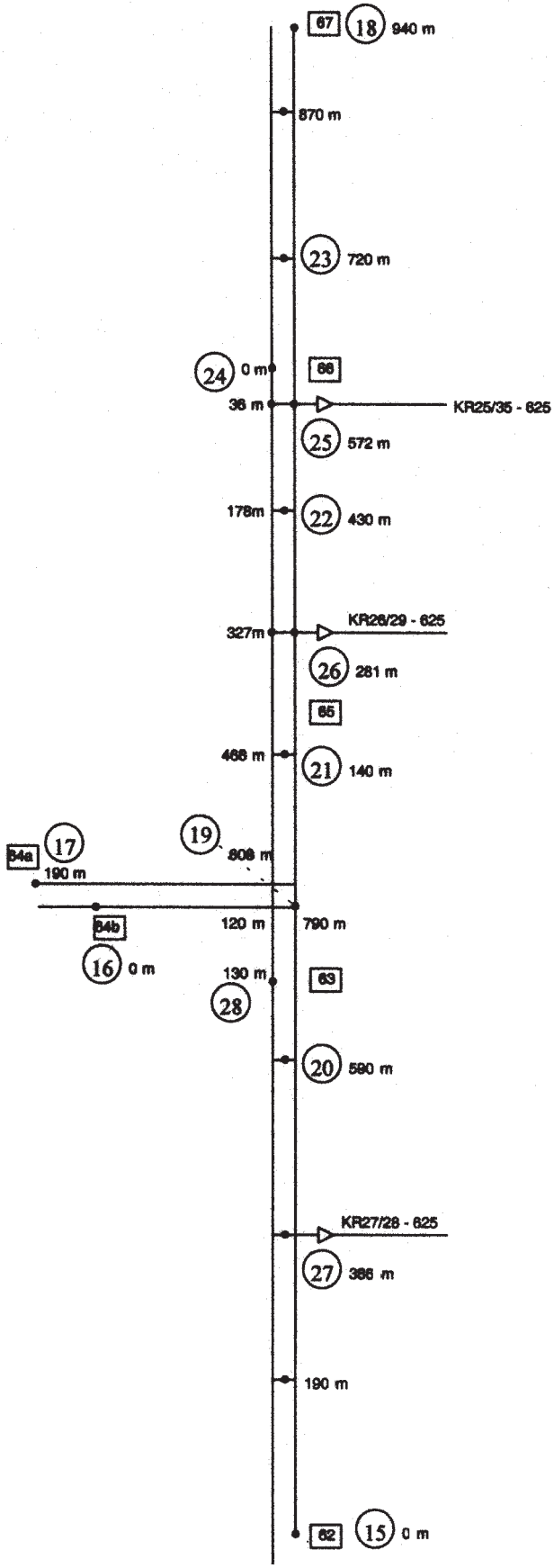
Rys. 10. Rozmieszczenie przystanków i sygnalizacji świetlnej w rejonie zasilania podstacji PT



Rys. 11. Zorientowanie obiektów wzdłuż gałęzi ruchu



Rys. 12. Lokalizacja i przykładowa numeracja węzłów sieci górnej



Rys. 13. Lokalizacja i przykładowa numeracja węzłów sieci dolnej

Tablica 2

Lista zatrzymań na obszarze rejonu PT

Gałąź	Położenie	Typ [m]	Indeks zatrzymania	Uwagi
1	50	1	1	p31
1	770	1	2	p32
1	770	3	1	
3	0	2	11	s8
3	100	1	3	p22
3	100	3	1	
4	90	1	4	p51
4	90	2	12	s8
5	25	2	1	s3
5	160	2	2	s4
5	260	1	5	p12
5	260	2	3	s5
5	417	2	4	s6
5	588	1	6	p13
5	588	3	1	
6	191	2	5	s6
6	328	1	7	p41
6	328	2	6	s5
6	448	2	7	s4
6	572	1	8	p42
6	572	2	8	s3
6	784	2	9	s2
6	884	2	10	s1

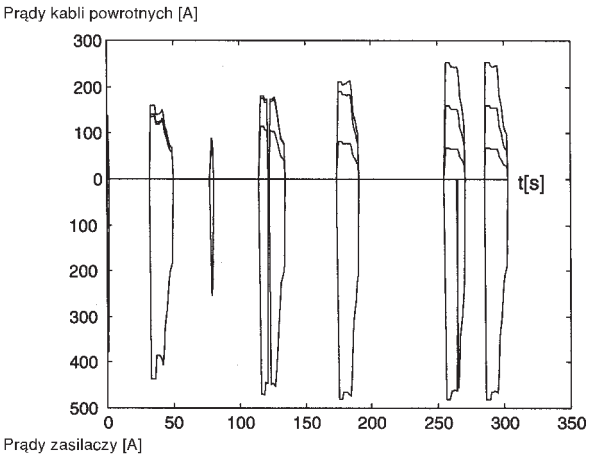
Rejestracje przeprowadzano z krokiem analizy 1 s.

Przykładowy wydruk wyników programu – przebieg obciążenia sieci kablowej i sieci jezdnej rejonu podstacji w czasie 5 min zamieszczono na rysunku 14.

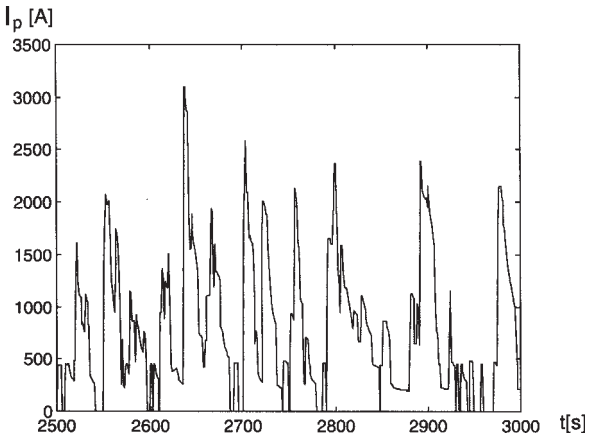
Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono przebiegi odpowiednio obciążenia podstacji i odpowiadający temu odcinkowi czasowemu (500 s) przebieg prądu zasilacza K5/15.

Przedstawione przykładowe wyniki symulacji zostały zweryfikowane pomiarami w warunkach rzeczywistych [20], a wyniki pomiarów porównane z zastosowaniem testu Kołmogorowa-Smirnowa [24]. Dla wybranych zasilaczy i podstacji sprawdzona została hipoteza, że rozkłady wartości prądu 5-sekundowego uzyskane z pomiarów i symulacji mają równe dystrybuanty. Sprawdzona została również analogiczna hipoteza dla wartości jednominutowych. Okazało się, że na poziomie istotności 0,01 nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że obie populacje wyników mają tę samą dystrybuantę.

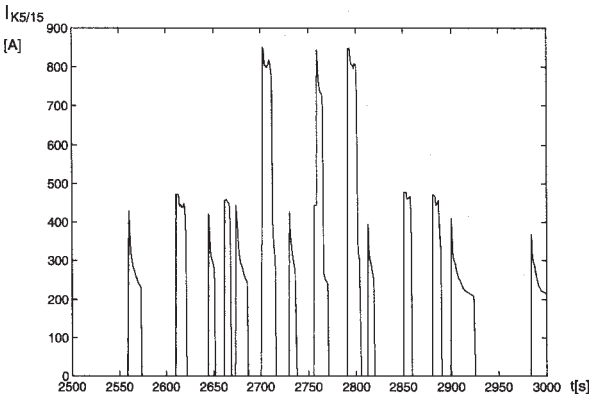
Porównując przebiegi wyników symulacji z przebiegami zarejestrowanych obciążeń rzeczywistych [20], należy stwierdzić dużą, zważywszy na charakter obiektu symulacji, występowanie zakłóceń, jak i pewną dozę niepewności co do założeń (rzeczywiste częstości kursowania tramwajów w stosunku do przyjętych), zbieżność wyników wartości prądów



Rys. 14. Fragment wyników obciążenia sieci kablowej podstacji



Rys. 15. Fragment przebiegu prądu obciążenia podstacji



Rys. 16. Fragment prądu obciążenia zasilacza K5/15

zastępczych: godzinnych, 30-minutowych, 15-minutowych, jednominutowych, jak i 10-sekundowych.

Uzyskane z symulacji przebiegi i wartości zastępcze obciążeń zasilaczy, kabli powrotnych i podstacji pozwalają na prawidłowe zwymiarowanie urządzeń, aparatury oraz konfiguracji układu zasilania z możliwością przeprowadzenia wielowariantowych obliczeń dla różnych zestawów danych. Mogą także stanowić podstawę do oceny energochłonno-

ści systemu, zamawiania mocy szczytowej, czy oceny efektywności rekuperacji, z uwzględnieniem wpływu układu zasilania i sposobu prowadzenia ruchu pojazdów. Przebiegi napięć w sieci trakcyjnej umożliwiają dokonanie oceny zdolności przesyłowej układu zasilania (graniczna zdolność przewozowa), szczególnie w warunkach awaryjnych czy na krańcach sieci. Postprocesorowe programy wykorzystujące wyniki symulacji pozwalają na ocenę oddziaływania systemu zelektryfikowanego transportu na zasilający system elektroenergetyczny (harmoniczne, wahania napięcia) i infrastrukturę techniczną (zagrożenie od upływu prądów błądzących).

Podsumowanie

Współcześnie dostępne środki techniczne, takie jak techniki komputerowe i metody symulacyjne, stwarzają specjalistom pracującym w zakresie systemów zelektryfikowanego transportu miejskiego możliwości, jakich nie dawały wcześniej stosowane metody analityczne. Dzięki opracowaniu modeli komputerowych możliwe jest bardziej dokładne analizowanie złożonych systemów transportu zelektryfikowanego z uwzględnieniem trudnych do ujęcia w metodach teoretycznych zagadnień, takich jak: nierównomierność i zakłócenia w ruchu, rozpływy prądów w sieci zasilającej i powrotnej, z uwzględnieniem nierównomierności potencjałów punktów powrotnych, wzajemne oddziaływanie układu zasilania i pojazdów poprzez napięcie w sieci trakcyjnej, nierównomierność obciążenia kabli zasilających i podstacji, efektywność rekuperacji energii hamowania, zagadnienia oddziaływań zakłócających [23].

Zakres symulacji i struktura modelu oraz uzyskiwany zbiór wyników można zorientować na określoną grupę zagadnień w celu rozwiązania konkretnych problemów, np.:

– ocena jakości zasilania (wyższe harmoniczne, spadki i poziomy napięć),
– optymalizacja podziału na sekcje, z uwzględnieniem rozmieszczenia punktów powrotnych według kryterium dopuszczalnych spadków napięć w szynach lub minimalizacji strat energii bądź według innego kryterium optymalizacyjnego,
– wytycznych do minimalizacji zużycia energii na cele trakcyjne,
– ocena stopnia obciążenia urządzeń obwodu głównego układu zasilania,
– ocena poziomów nastaw urządzeń zabepieczeń (np. wyzwalaczy wyłączników szybkich) i sterowania,
– badania trendów i prognoz wzrostu obciążeń przy pracach studialnych modernizacji systemu transportowego.

❑

Autorzy:
Zbigniew Drążek, Leszek Mierzejewski, Adam Szeląg
Zakład Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej

Literatura

[1] Mierzejewski L., Szeląg A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego.* WPW, Warszawa 1989.
[2] Osowski S.: *Komputerowe metody analizy i optymalizacji obwodów elektrycznych.* WPW, Warszawa 1993.
[3] Podoski J.: *Tramwaj szybki – projektowanie i eksploatacja.* WKŁ 1983.
[4] Drążek Z.: *Symulacja obciążenia zasilaczy podstacji tramwajowej w rejonach o skomplikowanej konfiguracji sieci*. Przegląd Elektrotechniczny 10-11/1991.
[5] Drążek Z., Mierzejewski L., Szeląg A.: *Zasilanie dwustronne w trakcji miejskiej.* Technika Transportu Szynowego 2/1996.
[6] Drążek Z., Mierzejewski L., Szeląg A.: *Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej* (1). Technika Transportu Szynowego 7-8/2001.
[7] Drążek Z., Mierzejewski L., Szeląg A.: *Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej* (2). Technika Transportu Szynowego 9/2001.
[8] Ogrodzki J.: *Komputerowa analiza układów elektronicznych.* PWN, Warszawa 1994.
[9] Kniat J.: *Wpływ sygnalizacji świetlnej na wielkość jednostkowego zużycia energii w tramwajach komunikacji miejskiej.* Praca doktorska, PW 1980.
[10] *Yale University Department of Computer Science Yale Sparse Matrix Package*, Research Report #114, 1974.
[11] Szeląg A.: *Analiza obciążeń układu zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego metodą symulacji komputerowej.* Praca doktorska, PW 1989.
[12] *Transport Research APAS Urban Transport Modelling of urban transport*. Office of Official Publications of the European Communities, Luxemburg.
[13] Burrow I.J. (1987) OSCADY: *A computer program to model capacities, queues and delays at isolated signal junctions*. Research Report RR105, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.
[14] Hall M.D., Van Vliet D., Willumsen L.G. (1980) SATURN: *A simulation assigment model for the evaluation of traffic management schemes*. Traffic Engineering and Control 21 (2).
[15] Drążek Z.: *Kompleksowy macierzowy model obciążenia obszaru zasilania komunikacji tramwajowej.* VI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'94. Zakopane, październik 1994.
[16] Shao Z.Y., Chan W.S., Allan J., Mellit B.: A *new method of DC power supply modelling for rapid transit railway system simulation.* Railway Design and Management 1995.
[17] Yan Cai: *A two ladder DC supplied railway network model for analysing rail potential distributions. Research Report* 1993.
[18] Mrozek B., Mrozek Z.: *MATLAB uniwersalne środowisko do obliczeń naukowo-technicznych.* PLJ, Warszawa1996.
[19] Osowski S., Toboła A.: *Analiza i projektowanie komputerowe obwodów z zastosowaniem języków MATLAB i PCNAP.* WPW, Warszawa 1995.
[20] Drozdowski P.: *Wprowadzenie do MATLAB-a 1995*. Skrypt Politechniki Krakowskiej.
[21] *External Interface Guide 1994,* The MathWorks Inc.
[22] Drążek Z.: *Symulacyjna metoda analizy systemów zasilania elektrycznej trakcji miejskiej prądu stałego*. Praca doktorska, PW 1998.
[23] Mierzejewski L., Szeląg A.: *Funkcjonowanie systemu elektroenergetyki trakcyjnej prądu stałego w warunkach eksploatacji taboru z rekuperacją energii*. Technika Transportu Szynowego 6/2001.
[24] Maksymiuk J., Wohlmut F.: *Metody statystyczne w inżynierii elektrotechnicznej.* WPW, Warszawa, 1984.