

Badanie ruchu tramwajowego za pomocą symulacji komputerowej

W wielu aglomeracjach w Polsce wprowadza się lub planuje wprowadzenie do eksploatacji nowoczesnego taboru tramwajowego z rozruchem bezoporowym, przystosowanego do hamowania rekuperacyjnego. Symulacja komputerowa jest praktycznie jedyną metodą, pozwalającą w miarę dokładnie ocenić efektywność energetyczną hamowania z odzyskiem energii w trakcji elektrycznej. W artykule przedstawiono opis i możliwości programu symulacyjnego dla trakcji tramwajowej oraz niektóre wyniki symulacji przeprowadzonych dla wybranego rejonu w centrum Łodzi.

Gwałtownie wzrastający w ostatnich latach ruch samochodowy, wymuszający ciągły rozwój i zmiany w sygnalizacji świetlnej, dostosowywanej przede wszystkim do potrzeb tego ruchu, oddziałuje na przepustowość ruchu tramwajowego. Pewien, niewielki zresztą wpływ na tę przepustowość ma również wprowadzanie do eksploatacji nowoczesnego taboru, o lepszej dynamice (np. w Łodzi tramwajów Cityrunner). Celowe zatem stało się opracowanie modelu symulacyjnego, pozwalającego szybko i łatwo badać wpływ różnorodnych czynników, związanych zarówno z taborem i układem zasilania, jak i z organizacją ruchu, na płynność jazdy tramwajów na wybranym obszarze miasta.

Drugą przesłanką do budowy modelu była potrzeba użycia stosunkowo precyzyjnego narzędzia, pozwalającego badać wpływ wprowadzania nowoczesnego taboru na warunki pracy układu zasilania i oceniać rzeczywiste efekty energetyczne takiej wymiany taboru. O ile oszczędności w zużyciu energii trakcyjnej płynące ze stosowania rozruchu bezoporowego można stosunkowo prosto oszacować, np. na podstawie wykonanych przejazdów teoretycznych na poszczególnych liniach, to zyski energetyczne wynikające ze stosowania rekuperacji można prognozować jedynie na podstawie badań symulacyjnych, gdyż innymi metodami trudno *a priori* założyć, jaka część całkowitej energii hamowania rekuperujących pojazdów może być przesłana do innych tramwajów. Aby hamujący pojazd mógł oddawać energię, napięcie na jego od-

bieraku nie może przekraczać dopuszczalnego napięcia sieci. Aby warunek ten był spełniony, nie jest wystarczające występowanie w danym momencie w jego rejonie zasilania odbiorców pobierających z sieci trakcyjnej odpowiednią moc (co już jest trudne do określenia, nawet przy użyciu metod stochastycznych), lecz ponadto spadki napięć na drodze przepływu energii rekuperacji muszą być odpowiednio małe. Procentowy udział energii możliwej do odzyskania w całkowitej energii hamowania zależy zatem od wielu czynników, z których najistotniejsze to:

- wielkość obszaru zasilania podstacji trakcyjnej;
- parametry układu zasilania, takie jak: napięcie stanu jałowego podstacji, oporność jednostkowa i długości poszczególnych sekcji i zasilaczy;
- dopuszczalna wartość napięcia w sieci trakcyjnej;
- natężenie ruchu na badanym obszarze.

Wszystkie wymienione czynniki muszą być uwzględniane w metodach symulacyjnych, których istotą jest ciągłe obliczanie i śledzenie stanu układu zasilania. Stosowane od lat metody analityczne opierają się natomiast na obliczeniach probabilistycznych, z natury rzeczy bardzo przybliżonych i w efekcie mało wiarygodnych.

Poniżej przedstawiony zostanie program symulacyjny, opracowany przez autora artykułu, który pozwala na wszechstronne badania ruchu tramwajowego. Program uwzględnia wszystkie najistotniejsze parametry taboru, układu zasilania oraz rozkład jazdy, działanie sygnalizacji świetlnej, losowe zakłócenia w jeździe tramwajów i wiele innych czynników wpływających w istotny sposób na płynność ruchu.

Zasada działania programu symulacyjnego

Schemat blokowy programu przedstawiono na rysunku 1. Symulacja przeprowadzana jest dla obszaru będącego rejonem zasilania jednej podstacji trakcyjnej. Program działa ze stałym, wczytywanym w danych wejściowych, krokiem czasu. Dla każdego kroku wykonywany jest następujący cykl obliczeń.

■ Blok rozkładu jazdy sprawdza, czy w badany rejon nie wjechał nowy tramwaj oraz czy któryś z tramwajów nie opuścił tego rejonu, a następnie przekazuje te informacje do bloku przejazdów teoretycznych.

■ Blok przejazdów teoretycznych wykonuje przejazdy wszystkimi tramwajami znajdującymi się w rejonie zasilania. Ponieważ przejazdy wykonywane są przy uwzględnieniu chwilowych wartości napięć na odbierakach, blok ten współpracuje ściśle z blokiem obliczeń układu zasilania, przekazując mu informacje o usytuowaniu wszystkich tramwajów i prądach pobieranych przez nie z sieci, a następnie pobierając z niego informacje o aktualnych napięciach na odbierakach. W związku z tym, że wyniki przejazdów (nowe usytuowanie tramwajów i wartości prądów pobieranych przez nie z sieci) zależą od napięć na odbierakach, a napięcia te zależą z kolei od wyników przejazdów, cykl obliczeń przejazdu – spadki napięć wykonywany jest w pętli aż do osiągnięcia przyjętej dokładności obliczeń.

■ Następnym etapem działania programu jest sprawdzenie, czy na odbieraku któregoś z tramwajów nie zostało przekroczone dopuszczalne napięcie sieci, co może mieć miejsce

jedynie w przypadku rekuperacji. Jeżeli taka sytuacja zaistnieje, tramwaj ten zostaje przełączony na hamowanie oporowe i cały cykl obliczeń opisany w poprzednim punkcie zostaje powtórzony. Taki cykl postępowania powtarzany jest w pętli tak długo, dopóki napięcie na odbieraku żadnego tramwaju nie będzie przekraczać wartości dopuszczalnej.

Po zakończeniu obliczeń dla danej chwili czasowej, wartości wielkości elektrycznych (prądy zasilaczy i wartości napięć na odbierakach) zostają zapisane w plikach wynikowych, a na ekranie monitora w postaci graficznej przedstawione zostaje usytuowanie wszystkich tramwajów w badanym rejonie. Następnie, o ile łączny czas symulacji nie został osiągnięty, program powtarza obliczenia dla następnego kroku czasowego.

Opis podstawowych bloków programu

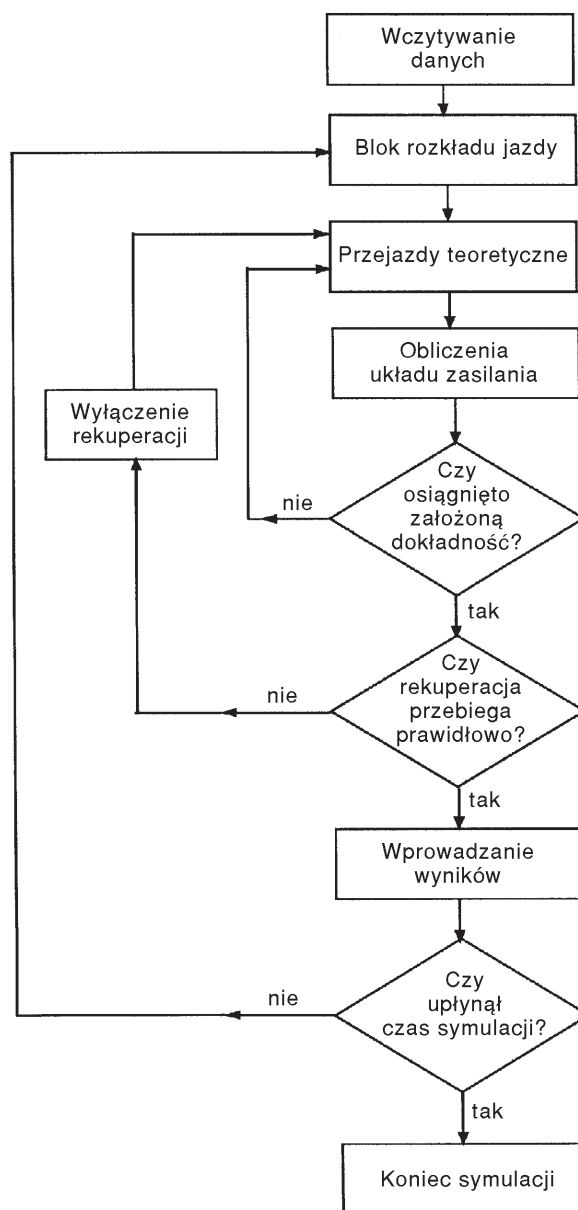
Blok rozkładu jazdy spełnia następujące funkcje:

- rozmieszcza wstępnie tramwaje w momencie startu symulacji;
- generuje tramwaje wjeżdżające w badany rejon podczas trwania symulacji;
- przemieszcza tramwaje opuszczające aktualną sekcję, do sekcji kolejnej, zgodnie z numerem trasy poszczególnych tramwajów;
- eliminuje tramwaje opuszczające badany rejon.

Wstępne rozmieszczenie tramwajów oraz wjazdy kolejnych, w trakcie symulacji, odbywają się zgodnie z czytelnym w danych wejściowych rozkładem jazdy, przy czym możliwe jest prowadzenie ruchu dokładnie według rozkładu lub z generowanymi losowo spóźnieniami we wjazdach tramwajów. Dla każdej trasy podaje się procentowy udział wjazdów punktualnych oraz wartość średnią opóźnienia tramwajów niepunktualnych. Wartości opóźnień są następnie losowane przy użyciu generatora liczb pseudolosowych o wykładniczym rozkładzie prawdopodobieństwa (najlepiej oddającego warunki rzeczywiste). W podobny sposób można losowo przedłużać czas oczekiwania na przystankach. Dla każdego przystanku również – analogicznie jak przy wjazdach – wczytywany jest w danych wejściowych znamionowy czas postoju, procent odjazdów punktualnych i średnia wartość czasu przedłużenia postoju.

Przy konstruowaniu bloku przejazdów teoretycznych przyjęto, że tramwaj może się znajdować w jednym z sześciu stanów:

- rozruch – jazda z maksymalną (zgodnie z wczytywaną w danych charakterystyką trakcyjną) siłą pociągową;
- ustalona – jazda ze stałą prędkością;
- wybieg – jazda z wyłączonymi silnikami;
- hamowanie – hamowanie tramwaju do zatrzymania na przystanku lub powodowane stałym ograniczeniem prędkości na linii;
- hamowanie kolizyjne – hamowanie i postój przed światłami oraz hamowanie (wraz z ewentualnym postojem) wywołane zbyt bliską odległością do tramwaju poprzedzającego;
- postój – oczekiwanie na przystanku.



Rys.1. Schemat blokowy programu

Rozróżnienie między stanem hamowanie a stanem hamowanie kolizyjne wprowadzono z dwóch powodów. Po pierwsze, procedury opisujące te dwa stany z różnych przyczyn nieco się różnią. Po drugie, stosunek czasu pozostawania tramwajów w stanie hamowanie kolizyjne do całkowitego czasu przebywania tramwajów w badanym rejonie, wyznaczony dla całego okresu symulacji, traktowany jest jako podstawowy wskaźnik określający płynność ruchu.

Najtrudniejszym do rozwiązania problemem przy konstruowaniu modelu było takie zaprogramowanie jazdy tramwajów (wyboru jednej z wymienionych opcji w zależności od sytuacji ruchowej), aby nie tylko zapewnić poprawną i bezpieczną jazdę, ale również w miarę wiernie odtworzyć sposób prowadzenia tramwajów przez motorniczych. Dlatego w trakcie symulacji zdarzają się przypadki, że w pewnych sytuacjach, gdy podjęcie decyzji przez motorniczego nie jest oczywiste, podejmuje on działanie przesadnie ostrożne, np. przedwczes-

śnie rozpoczynając hamowanie przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną, czyli nie jedzie optymalnie z punktu widzenia wykorzystania przepustowości linii i minimalizacji zużycia energii. Podejmowanie decyzji w warunkach niepewności, realizowane jest w programie za pomocą losowań, przy czym prawdopodobieństwo wylosowania decyzji zbyt ostrożnej rośnie wraz ze wzrostem stopnia trudności prawidłowej oceny sytuacji ruchowej przez motorniczego. Oczywiście program nie dopuszcza do podejmowania decyzji niebezpiecznych, prowadzących np. do wjazdu tramwaju na skrzyżowanie przy zmianie świateł na czerwone lub niezachowania bezpiecznego odstępu do tramwaju poprzedzającego.

Blok obliczeń układu zasilania przystosowany został do powszechnie obecnie stosowanego w sieciach tramwajowych jednostronnego zasilania. Przyjęto, że na liniach dwutorowych sieci obydwu torów są łączone między sobą, a zasilacze zasilające wszystkie sekcje podłączone są do szyn zbiorczych jednej podstacji trakcyjnej – z punktu widzenia obliczeń elektrycznych obszarem, którego pracę można poprawnie symulować, jest zatem rejon zasilania jednej podstacji. Symulację większych obszarów można przeprowadzać jedynie pod kątem badania płynności ruchu i przepustowości linii.

Przyjęto, że wyłączniki zasilaczy nie są spolaryzowane, a zatem możliwy jest przepływ prądu z jednej sekcji do dru-

giej poprzez zasilacze i szyny podstacji, co ma miejsce w przypadku stosowania taboru przystosowanego do hamowania z odzyskiem energii. Oczywiście hamowanie takie będzie miało miejsce jedynie wówczas, jeżeli napięcie na odbieraku hamującego tramwaju nie przekroczy wartości dopuszczalnej.

Symulowana może być praca układu elektroenergetycznego wyposażonego zarówno w podstację prostownikową, jak i w podstację prostownikowo-falownikową, przystosowaną do odbioru nadmiarowej energii rekuperacji.

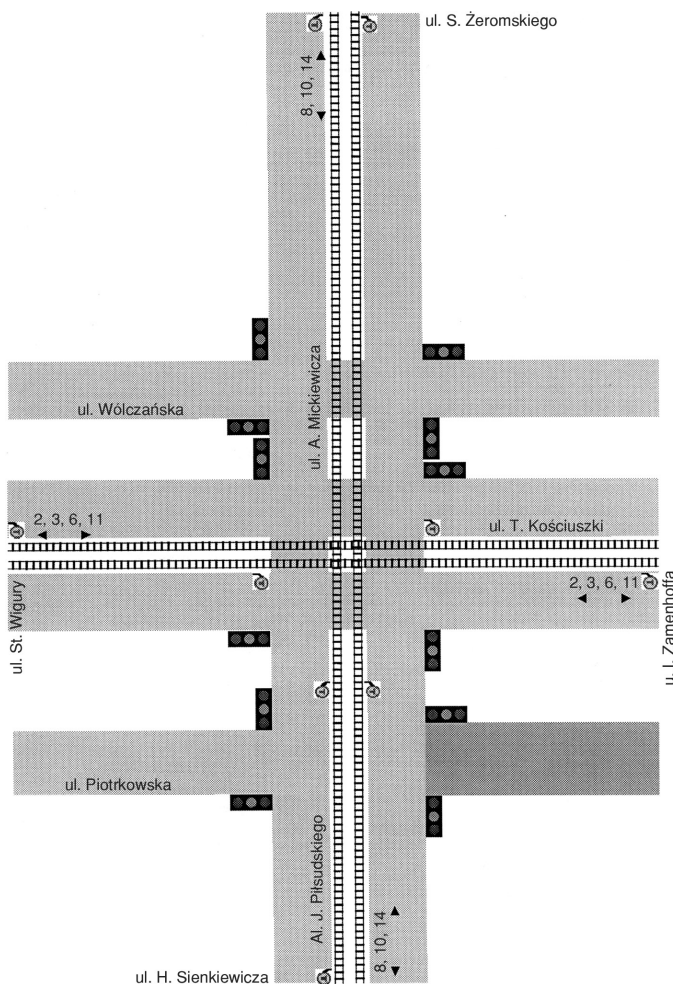
Pewne uproszczenie stanowi brak obliczeń rozptyłu prądów w sieci powrotnej. Zmniejszenie błędów wywołanych tym uproszczeniem można uzyskać zwiększając oporność jednostkową sieci jezdnej o oporność sieci szynowej oraz oporność zasilaczy tak, aby uwzględnić chociaż w przybliżeniu spadek napięcia na kablach powrotnych.

Program napisany został w języku Object Pascal za pomocą kompilatora Delphi 5.0.

Wyniki symulacji, w postaci przemieszczających się tramwajów można śledzić na ekranie. Prędkość symulacji można regulować w trakcie działania programu. Ponadto program zlicza łączny czas przebywania w badanym rejonie wszystkich tramwajów oraz czas pozostawania ich w stanie hamowania kolizyjnego. Chwilowe wartości prądów zasilaczy, podstacji i napięć na odbierakach (w kolejnych krokach obliczeniowych) zapisywane są w plikach wynikowych. Do opracowywania wyników zapisanych w tych plikach napisane zostały osobne programy.

Przykładowe symulacje

W celu zilustrowania działania programu przeprowadzono symulacje pewnego obszaru w centrum Łodzi, obejmującego między innymi bardzo obciążone skrzyżowanie ulic Kościuszki i Mickiewicza (rys. 2). Przez rejon ten przebiega siedem linii tramwajowych. Składa się na niego 5 sekcji zasilania. Symulacje przeprowadzono w wielu wariantach. Niezmienne w tych wariantach były parametry układu zasilania, cykle sygnalizacji świetlnej, ograniczenia prędkości i usytuowania przystanków, odpowiadające obecnemu stanowi. Zmieniano natomiast natężenie ruchu i typ taboru. Symulacje wykonano dla eksploatowanych obecnie w Łodzi tramwajów 805Na, tramwajów 805N z czoperem wykonanym na tranzystorach IGBT oraz tramwajów Cityrunner. Te dwa ostatnie rodzaje taboru przystosowane są do hamowania z odzyskiem energii. Tramwaje 805N jeździły w składach dwuwagonowych. Pojemność takiego zestawu jest o 15% większa od pojemności tramwaju Cityrunner. Jako wyjściowe przyjęto natężenie ruchu występujące obecnie w godzinach szczytu, definiowane jako liczba tramwajów wjeżdżających w jednostce czasu w badany rejon. Następnie przeprowadzono symulacje dla natężeń zmienianych od 0,4 do 2 natężenia wyjściowego. We wszystkich symulacjach przyjęto średnie spóźnienie tramwajów wjeżdżających w badany rejon równe 10 s oraz średnie przedłużenie czasu postoju na przystankach równe 5 s. Czas symulacji we wszystkich wariantach wynosił 10 min.



Rys. 2. Szkic symulowanego rejonu

Wyniki symulacji

Natężenie ruchu	805Na				805N z czoperem					Cityrunner				
	t.c. [s]	t.h.k. [s]	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t.c. [s]	t.h.k. [s]	I_{sr} [A]	U_{srt} [V]	U_{srr} [V]	t.c. [s]	t.h.k. [s]	I_{sr} [A]	U_{srt} [V]	U_{srr} [V]
0,4	1319	66	349	612	1423	106	283	618	672	1370	109	226	622	665
0,6	2165	168	560	607	2311	150	416	622	663	2239	162	335	622	685
0,8	3154	244	811	587	3194	264	561	611	667	3104	323	468	613	657
1,0	4015	234	1002	586	4009	288	664	610	656	3960	254	512	618	648
1,2	4746	439	1204	569	4608	361	784	599	652	4681	368	649	604	652
1,4	6568	1091	1487	549	6545	1167	935	587	649	6437	1135	746	596	641
1,6	8312	2229	1667	545	8077	2082	991	588	644	8242	2252	860	582	633
1,8	9909	3280	1849	532	9786	3213	1075	582	640	9678	3250	916	582	636
2,0	10746	3882	1885	529	10640	3843	1073	583	641	10486	3865	806	590	631

Natężenie ruchu – krotność natężenia ruchu, wartości 1 odpowiada obecne natężenie w godz. szczytu.

t.c. – łączny czas przebywania w badanym rejonie wszystkich tramwajów.

t.h.k. – łączny czas hamowania kolizyjnego w badanym rejonie wszystkich tramwajów.

I_{sr} – prąd średni podstacji za okres symulacji.

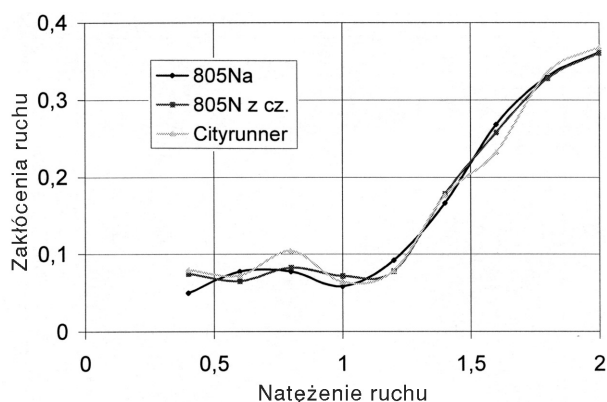
U_{srt} U_{srr} – napięcie średnie na odbierakach tramwajów, odpowiednio za czas poboru prądu i hamowania rekuperacyjnego.

Wyniki symulacji przedstawiono w tablicy 1, a na rysunkach 3 i 4 zobrazowano niektóre z tych wyników w formie wykresów.

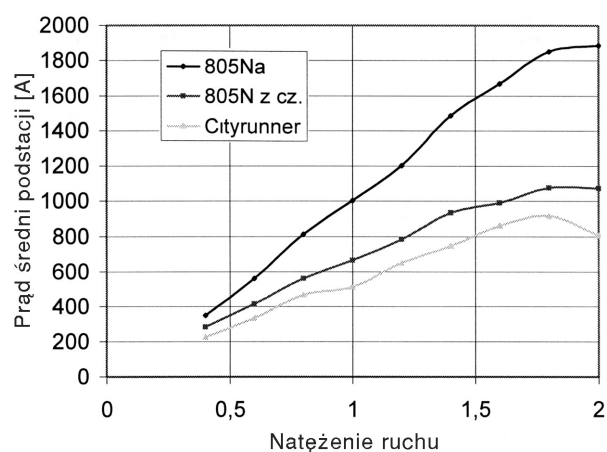
Opisujące oszereżonych na rysunku 3 zakłócenia ruchu zdefiniowane są jako stosunek czasu hamowania kolizyjnego do całkowitego czasu przebywania w badanym rejonie wszystkich tramwajów.

Obserwacja symulacji na ekranie oraz analiza wyników zestawionych w tablicy 1 pozwala na wyciągnięcie wielu wniosków. Zauważono, że przy natężeniach ruchu o krotności przekraczającej 1,2 zaczynają tworzyć się kolejki tramwajów przed skrzyżowaniami i przystankami, a zatem tę wartość natężenia ruchu należy uznać za graniczną dla badanego rejonu. Być może zmiana cyklu sygnalizacji świetlnej i usytuowania przystanków mogłaby nieco poprawić sytuację. Obserwację wizualną potwierdzają wyniki końcowe – przy krotnościach większych od 1,2, gwałtownie rośnie stosunek czasu hamowań kolizyjnych do całkowitego czasu przebywania tramwajów w badanym rejonie (rys. 3), niezależnie od typu taboru. Zatykanie się linii i skrzyżowań znajduje również odbicie w prądach obciążenia podstacji. Najbardziej można to zaobserwować, porównując prądy podstacji dla krotności 1,8 i 2,0. Przy większej częstotliwości wjazdów tramwajów w badany obszar (krotność 2,0), prądy podstacji wypadają mniejsze, ponieważ coraz większa liczba tramwajów stoi w korkach lub bardzo wolno się porusza.

Jak można było się spodziewać, efektywność energetyczna hamowania rekuperacyjnego rośnie wraz z natężeniem ruchu. Wyraźnie można to zaobserwować, porównując prądy średnie podstacji, będące miernikiem zużycia energii, przy symulacji z użyciem taboru 805Na i 805N z czoperem. Przy krotności natężenia ruchu 0,4, stosowanie nowszego taboru daje oszczędności w zużyciu energii około 19%, zaś przy krotności 1,2 – 35%. Ponieważ oszczędności płynące ze stosowania rozruchu bezoporowego nie zależą od natężenia ruchu, wzrost ten jest efektem rosnącej wraz z natężeniem ruchu skuteczności rekuperacji.



Rys. 3. Zależność zakłóceń w ruchu od jego natężenia



Rys. 4. Zależność prądu średniego podstacji od natężenia ruchu i rodzaju taboru

Symulacje wykazały, że tramwaje Cityrunner zużywają o 20–23% mniej energii trakcyjnej od tramwajów 805N z czoperem. Pamiętać jednak należy, że ich pojemność jest jednocześnie o 15% mniejsza.

Jak było do przewidzenia, stosowanie nowoczesnego taboru zmniejsza spadki napięć w układzie zasilania. Jest to

efektem zarówno obniżenia wartości prądów pobieranych podczas rozruchu, jak i stosowania rekuperacji. Z porównania wyników symulacji dla tramwajów 805Na i 805N z czoperem widać, że są to różnice znaczące. Przykładowo, przy prowadzeniu ruchu tramwajami 805Na i przy obecnym natężeniu ruchu, średnia wartość napięcia na odbierakach tramwajów za czas poboru prądu wynosi 586 V, zaś przy stosowaniu taboru 805N z czoperem i przy natężeniu ruchu zwiększonym o 20%, wartość ta rośnie do 599 V.

Wyniki symulacji, wykonywanych dla tych samych danych wejściowych, nie są w pełni powtarzalne, wynika to oczywiście z przyjęcia losowych zakłóceń w ruchu tramwajów. Stwierdzono jednak, że można temu przeciwdziałać, przeprowadzając symulacje dla dłuższych okresów.

Podsumowanie

Badania symulacyjne można wykorzystywać nie tylko do prognozowania, jakie oszczędności energii uzyska się dzięki wprowadzeniu do eksploatacji nowoczesnego taboru, lecz również do badania wpływu różnego rodzaju działań modernizacyjnych na płynność ruchu czy warunki pracy układu zasilania, przy czym niektóre z takich działań mogą nic nie kosztować, a przynieść wymierne efekty. Przykładem takiego działania może być obniżenie napięcia stanu jałowego podstacji trakcyjnych po wprowadzeniu nowoczesnego taboru.

Jak wykazały wyniki symulacji (tablica 1), wprowadzenie energooszczędnego taboru zmniejsza spadki napięć w sieci, co pozwala na obniżenia napięcia wyjściowego podstacji. Z kolei obniżenie napięcia na szynach podstacji zwiększa efektywność energetyczną hamowania rekuperacyjnego, dając kolejne oszczędności w zużyciu energii. Optymalną wartość napięcia łatwo znaleźć, wykonując odpowiednie symulacje.

Spośród trzech rodzajów trakcji szynowej: kolei, metra i trakcji tramwajowej, ta ostatnia jest najtrudniejsza do zamodelowania, ze względu na jej bezpośrednią styczność z ruchem pieszym i samochodowym. Przedstawiony program nie jest na pewno narzędziem doskonałym, tego typu programy można ciągle ulepszać, przede wszystkim pod kątem zwiększenia wierności odwzorowania rzeczywistych warunków ruchu. Wszelkie niedoskonałości programu w tym względzie najłatwiej zauważyć, przeprowadzając symulacje w zwolnionym tempie i obserwując ich przebieg na ekranie monitora. Tym niemniej wydaje się, że już w obecnej postaci prezentowany program jest przydatnym narzędziem do kompleksowego badania ruchu tramwajowego z uwzględnieniem pracy układu zasilania.



➤ *Dokończenie ze s. 65*

Kolejnym argumentem przemawiającym za pełnym rozwojem technicznych form nadzoru jest stworzenie możliwości monitorowania wszystkich istotnych dla funkcjonowania układu zasilania urządzeń i poprzez działający podsystem archiwizacji informacji o zdarzeniach zapobieganie powstawaniu uszkodzeń elementów nadmiernie obciążonych. Posiadanie przez nadzorującego pracę systemu pełnej informacji o liczbie i częstotliwości zadziałań poszczególnych elementów, zwłaszcza w przypadkach automatycznego powrotu stacji do normalnej pracy, pozwala na prowadzenie rzetelnej eksploatacji oraz planowanie właściwej polityki konserwacyjnej i remontowej. Analiza pozyskanych tą drogą obiektywnych danych pozwala przewidywać stany awaryjne i w wielu przypadkach wyprzedzająco im przeciwdziałać. Prowadzenie analizy zarejestrowanych czynności łączeniowych w stacji w dłuższym okresie pozwala na ocenę sprawności energetycznej konkretnego rejonu komunikacyjnego pod kątem pokrycia wymagań stawianych przez organizatora ruchu tramwajowego. W tym przypadku informacje te powinny stanowić podstawę do analizy parametrów zabezpieczeń, gęstości ruchu lub konfiguracji układu zasilania. Należy zwrócić uwagę na właściwą konfigurację zarówno w części DC, dotyczącej energii trakcyjnej, jak i w zakresie obejmującym dostawę

i rozdział średniego napięcia AC po stronie zakładu energetycznego.

Istotny jest aspekt organizacyjny, na który urządzenia techniczne mają znaczący wpływ. Informacje o funkcjonowaniu układu zasilania i podejmowanych na bieżąco czynnościach konserwacyjnych i operatorskich, dostępne w systemie mogą być bez przeszkód przekazywane do innych służb technicznych odpowiedzialnych za poprawne funkcjonowanie komunikacji tramwajowej oraz do jednostek nadrzędnych dokonujących oceny efektywności realizacji powierzonych zadań [3].



Literatura

- [1] *Koncepcja modernizacji systemu zdalnego sterowania stacjami tramwajowymi w Krakowie*. Projekt techniczny jednostadiowy. Elektroprojekt, Łódź 1997.
- [2] *Stacja prostownikowa trakcyjna Wielopole w Krakowie (tom 5). Telemechanika w stacji*. Projekt techniczny jednostadiowy. Elektroprojekt, Łódź 1997.
- [3] *Koncepcja funkcjonowania i oprogramowania Centrum oraz analiza systemu łączności*. Projekt techniczny. Elester PKP, 2001.
- [4] *Projekt wykonawczy włączenia podstacji Dąbie do systemu zdalnego sterowania*. Elester PKP, 2002.