

Ireneusz Chrabąszcz, Mateusz Potempa, Janusz Prusak

# Zmienność napięcia na odbieraku tramwaju – analiza wybranych przypadków metodą symulacji

**Energia elektryczna (specyficzny forma towaru), dostarczana przez podstacje trakcyjne do zasilania układów napędowych pojazdów szynowych (w rozpatrywanym przypadku pojazdów tramwajowych), powinna charakteryzować się (jak każdy towar będący przedmiotem handlu) odpowiednią jakością [1, 6, 7]. Przede wszystkim energia ta musi być dostarczana w sposób ciągły. Tramwaje powinny łagodzić problemy przewozowe, a nie dodatkowo blokować ruch na ulicach miast w przypadku awarii zasilania. Inną, ważną cechą tego towaru, jaki stanowi wspomniana energia, jest zachowanie odpowiedniego poziomu napięcia w miejscu jego odbioru, czyli na odbieraku pojazdu trakcyjnego.**

Udokumentowane stwierdzenie niedochowania właściwej jakości (poziomu) tego parametru może być podstawą roszczeń finansowych ze strony przewoźnika (właściciela lub firmy eksploatującej tramwaje), szczególnie w przypadku wywołanej tym awarii układów napędowych pojazdów trakcyjnych. Wobec tego w interesie firm odpowiedzialnych za zasilanie trakcji elektrycznej jest, aby pojawiające się zmiany (wahania) napięcia mieściły się w dopuszczalnych granicach. Dodatkowo znajomość przebiegu zmienności napięcia na odbieraku może stanowić podstawę do pogłębionej oceny (analizy) np.: pracy układu napędowego pojazdu w konkretnych warunkach, jak również jakości technicznej układu zasilania. A zatem należy wiedzieć, jak kształtuje się przebieg napięcia na odbieraku w funkcji czasu, czy też ewentualnie drogi.

W przypadku linii już eksploatowanych ocenę jakości napięcia zasilającego można przeprowadzić na podstawie wyników pomiarów zrealizowanych na wybranym tramwaju (tzw. pojeździe referencyjnym). Dla linii nowo budowanych lub poddawanych istotnej modernizacji, w miarę wiarygodnym sposobem otrzymania wstępnych danych jest przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych uwzględniających między innymi parametry elektryczne układu zasilania, profil poziomy i pionowy trasy, charakterystyki trakcyjne pojazdów, rozkłady jazdy i lokalizację przystanków.

Poziom napięcia na odbieraku prądu tramwaju, jak również każdego innego elektrycznego pojazdu trakcyjnego, jak to już wyżej wspomniano, powinien zawierać się w granicach przewidzianych stosownymi przepisami i normami [4, 5]. Pojazdy trakcyjne, w tym przypadku chodzi o tramwaje, są konstruowane i budowane na zasilanie napięciem, które zostało określone we wspomnianych wcześniej dokumentach. Przykładowo dla pojazdu typu NGT6, eksploatowanego w Krakowie, producent zaleca (mając na uwadze unormowania), aby wahania napięcia mieściły się w granicach – 30% do +25% w odniesieniu do napięć znamionowych 600 V lub 750 V [10].

W przedstawionym materiale zaprezentowano syntetycznie metodę oraz wyniki przeprowadzonej symulacji na podstawie rzeczywistych danych wybranej do badań eksploatowanej linii tramwajowej. Wzięto pod uwagę kilka wariantów dotyczących ruchu tramwajów, uwzględniono również zmiany niektórych parametrów elektrycznych układu zasilania (np. rezystancji na skutek wzrostu temperatury) przy tym samym (znanym) profilu trasy.

## Dopuszczalna zmienność napięcia [4]

W tabeli 1 przedstawiono dane odnoszące się do warunków zasilania trakcji tramwajowej o napięciu znamionowym 600 V DC.

Tabela 1

Prąd stały (wartości średnie)	
Napięcie najniższe nietrwale $U_{\min 2}$	[V]
Napięcie najniższe trwale $U_{\min 1}$	[V] 400
Napięcie znamionowe $U_n$	[V] 600 <sup>1)</sup>
Napięcie najwyższe trwale $U_{\max 1}$	[V] 720
Napięcie najwyższe nietrwale $U_{\max 2}$	[V] 770 <sup>2) 3)</sup>

<sup>1)</sup> Przyszłe systemy trakcyjne tramwajów i kolei lokalnych powinny odpowiadać znamionowym napięciom 750, 1500 lub 3000 V.

<sup>2)</sup> W przypadku hamowania odzyskowego może być dopuszczone napięcie  $U_{\max 1}$  równe 800 V.

<sup>3)</sup> W przypadku hamowania odzyskowego może być dopuszczone napięcie  $U_{\max 2}$  równe 1000 V.

gdzie:

$U_n$  – napięcie znamionowe – wartość napięcia, na którą system został zaprojektowany;

$U_{\max 1}$  – napięcie najwyższe trwale – największa wartość napięcia, która może występować dowolnie długo;

$U_{\max 2}$  – napięcie najwyższe nietrwale – największa wartość napięcia, która może występować nie dłużej niż 5 min;

$U_{\min 1}$  – napięcie najniższe trwale – minimalna wartość napięcia, która może występować dowolnie długo;

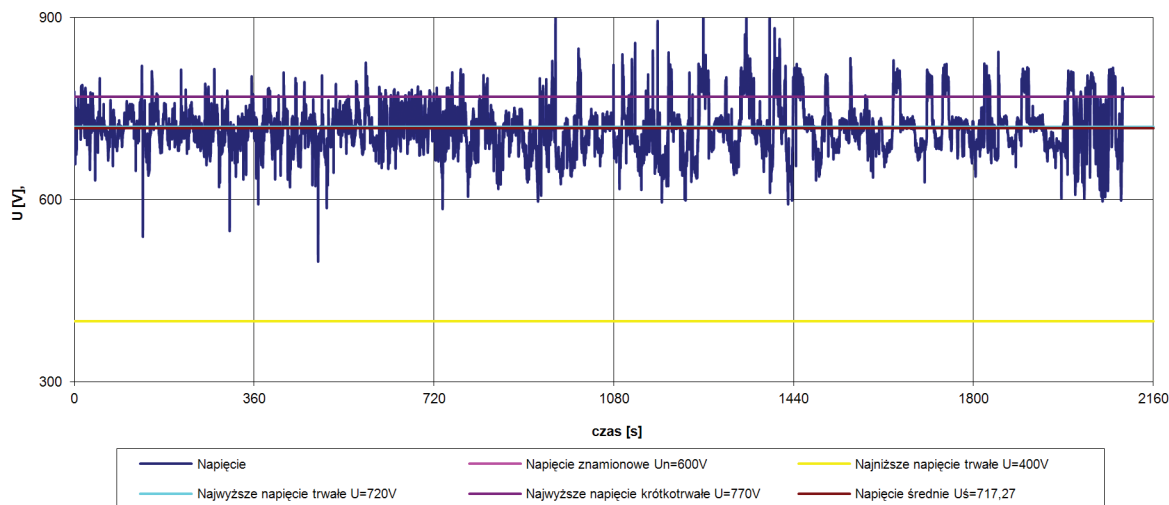
$U_{\min 2}$  – napięcie najniższe nietrwale – minimalna wartość napięcia, która może występować nie dłużej niż 10 min.

W normie znajduje się również stwierdzenie: „Nawet, jeśli tabela 1, nie wskazuje żadnej wartości, napięcie może spadać poniżej na krótkie okresy”.

## Wyniki pomiarów

Rzeczywisty przebieg napięcia na odbieraku tramwaju typu NGT 6 przedstawiono na rysunku 1. Pomiarzy były zrealizowane przed kilkoma laty przez pracowników Katedry Trakcji i Sterowania Ruchem Politechniki Krakowskiej w czasie badań testowych, z zakresu energochłonności, wspomnianego tramwaju [2, 3]. Czas przejazdu w jedną stronę wynosił 36 min i przebiegał w obszarach zasilania czterech podstacji trakcyjnych.

## trasa Łagiewniki - Kurdwanów 08.06.2001



Rys. 1 Przebieg napięcia na odbieraku tramwaju

W tabeli 2 zamieszczono, w uporządkowanej formie, wyniki pomiarów w odniesieniu do zalecanych przez przepisy [4] dopuszczalnych wartości napięcia na odbieraku tramwaju.

Tabela 2

### Wyniki pomiarów

Zdarzenie	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>P(m/n)</i>
$400 < U < 720$	4688	8400	0,5581
$U > 770$	957	8400	0,1139
$U = 600 \pm 5V$	16	8400	0,0019

gdzie:

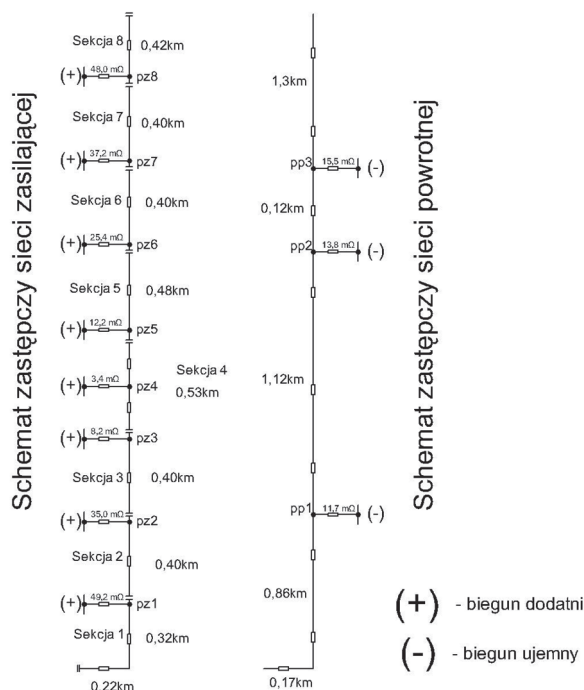
- n* – liczba wszystkich zdarzeń pomiarowych,
- m* – liczba zdarzeń dla danego zakresu pomiarowego,
- P(m/n)* – udział wystąpienia określonego poziomu napięcia w czasie pomiarów.

Jak widać (tab. 2), w zakresie dopuszczalnych długotrwale napięć według normy [4] (400 V–720 V), mieści się niecałe 56% uzyskanych wyników. Można zauważyć, że problemem jest również zbyt wysoki poziom tego napięcia. Ocena ta dotyczy obszarów zasilania wszystkich wspomnianych czterech podstacji trakcyjnych. Jedną z tych podstacji była nowo uruchomiona, a trzy pozostałe funkcjonowały już od dawna. Może to wskazywać, że problemem jest właściwa ocena wahań napięcia na odbierakach tramwajów. Można przypuszczać, że jednym z problemów jest brak inżynierskich metod pozwalających na w miarę dokładne oszacowanie tego zjawiska.

O ewentualnych finansowo-prawnych konsekwencjach niewłaściwego poziomu napięcia zasilającego wspomniano już we wstępie. Wiadomo również, że najwyższy współczynnik sprawności każdego urządzenia technicznego występuje w czasie jego pracy w warunkach znamionowych. Zbyt wysoki poziom napięcia na odbieraku powoduje, że układ napędowy tramwaju pracuje w warunkach dla niego niekorzystnych. Może to np. powodować zwiększone straty energii, a więc i zwiększenie kosztów eksploatacyjnych. Należy więc zawczasu poprawnie ocenić (oszacować) możliwą zmienność napięcia i dokonać np. właściwych nastaw (wybór zaczepek na uzwojeniach transformatorów zespołów prostownikowych) na podstacjach trakcyjnych.

### Wyniki obliczeń symulacyjnych

Wybrany odcinkiem do przeprowadzenia obliczeń (symulacji) zmian napięcia jest eksploatowany odcinek linii tramwajowej w Krakowie. Odcinek ten jest zasilany z podstacji trakcyjnej nr 13 o nazwie „Konarskiego”. Odległości międzyprzystankowe są różnej długości: najkrótszy odcinek ma 0,25 km, a najdłuższy 0,76 km. Łączne na danej trasie jest 8 przystanków w każdą stronę. Lokalizacja przystanków została uwzględniona w obliczeniach. Uwzględniono również profil trasy (wzniesienia, spadki i łuki). Największe wzniesienie (spadek) wynosi 1,1‰. Natomiast promienie łuków przyjmowały wartości: minimalny 20 m, maksymalny 1501 m. Część odcinków trasy jest pozioma i prosta (bez łuków).



pz1-pz8 - miejsca połączenia kabla zasilającego z siecią jezdnią  
pp1-pp3 - miejsca połączenia kabla powrotnego z szynami  
49,2 mΩ - wartości rezystancji kabla zasilającego lub powrotnego podana w mΩ

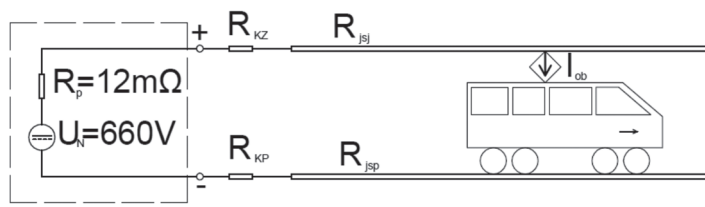
Rys. 2. Schemat zastępczy sieci zasilającej i powrotnej [8]

## Schematy zastępcze układu zasilania

Na rysunku 2 pokazano schematy zastępcze sieci trakcyjnej dla analizowanego odcinka.

Jak widać na rysunku 2, z podstacji wyprowadzone są kable do ośmiu punktów zasilających (pz1 do pz8). Długość tych kabli wynosi 13,6 km. Punkty powrotne są trzy (pp1, pp2, pp3). Długość kabli powrotnych wynosi 6,9 km. Natomiast długość sieci trakcyjnej wynosi 3,35 km, toru podwójnego. Średnia długość jednej sekcji zasilania wynosi około 419 m.

Dane (parametry) ze schematów (rys. 2 i 3) były wykorzystane do obliczeń spadków napięć w tej sieci i określenia wartości  $U(t)$  na odbieraku tramwaju.



Rys. 3. Uproszczony schemat zasilania tramwaju

$R_p$  - rezystancja wewnętrzna podstacji,  $U_N$  - napięcie znamionowe podstacji,  $R_{KZ}$  - rezystancja kabli zasilających,  $R_{KP}$  - rezystancja kabli powrotnych,  $R_{sj}$  - rezystancja sieci jezdnej (jednostkowa),  $R_{sjp}$  - rezystancja sieci powrotnej (jednostkowa),  $I_{ob}$  - prąd obciążenia trakcyjnego

## Opis taboru i charakterystyka ruchu tramwajów

Do obliczeń symulacyjnych przyjęto aktualny w danym czasie rozkład jazdy tramwajów. Rozkład jazdy tramwajów w obszarze zasilania podstacji trakcyjnej nr 13 został pobrany ze strony internetowej krakowskiego przewoźnika [9].

W tabeli 3 przedstawiono zbiorczo liczbę tramwajów poszczególnych linii, kursujących w obszarze zasilania wybranej podstacji.

Tabela 3

## Częstotliwość kursowania tramwajów na analizowanym odcinku zasilania

Liczba kursów w	Numer linii						Suma wszystkich tramwajów	Liczba tram./h
	4	8	13	14	20	24		
dni powszednie	100	95	96	58	90	26	465	23,25
soboty	53	49	48	51	46	-	247	12,35
święta	50	46	44	48	44	-	232	11,60

W dni powszednie tramwaje kursują średnio co ok. 3 min, a w soboty i święta co ok. 5 min. Do obliczeń (symulacji) przyjęto jeden typ tramwaju, pojazdem, tj. NGT6. Pojazd ten ma możliwość rekuperacji energii oraz – jako jeden z nielicznych – umożliwia uzyskanie rzetelnych informacji dotyczących charakterystyki trakcyjnej pojazdu i przebiegu siły pociągowej, niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń (symulacji).

## Wyniki obliczeń (symulacji) dla wybranych wariantów

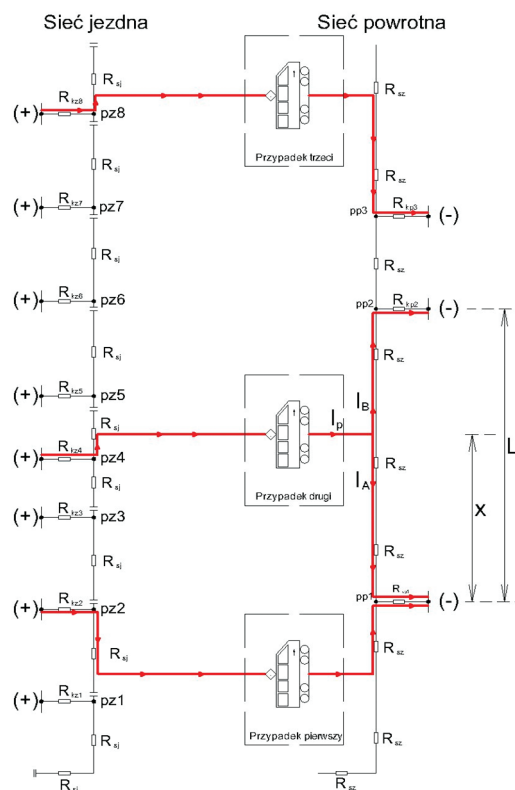
Przedstawione na rysunku 1 wyniki pomiarów spowodowały chęć sprawdzenia dostępnymi metodami obliczeniowymi (metodą symulacji) wpływu wybranych czynników na kształtowanie się poziomów napięć na odbierakach pojazdów tramwajowych, w nadziei że pozwoli to na sformułowanie uwag dotyczących kwestii odnośnie właściwej jakości napięcia na odbieraku tramwaju. Roz-

ważono kilkanaście wariantów, np. dotyczących ruchu tramwajów w celu uzyskania przebiegów zmian tego napięcia. Poniżej przedstawiono cztery wybrane przypadki, które autorzy uznali za najbardziej reprezentatywne.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy rozptył prądu dla trzech tramwajów w obszarze analizowanego odcinka zasilania.

Pod uwagę wzięto:

- dwie wartości napięcia znamionowego podstacji (660 V i 720 V);
- następstwo pojazdów co 3 min;
- możliwość hamowania z odzyskiem i bez odzysku.



Rys. 4. Przykładowy rozptył prądów dla trzech pojazdów w obszarze zasilania

$L$  - długość odcinka między pp1 a pp2,  $x$  - miejsce, w którym znajduje się tramwaj (pojazd referencyjny).

## Przypadek pierwszy, który umownie można nazwać nominalnym (czyli znamionowym)

Dane wyjściowe przyjęte do obliczeń symulacyjnych:

- $U_N = 660$  V,
- $R_p = 12$  mΩ,
- $R_{sj} = 0,0490$  Ω/km,
- $R_{sz} = 0,00594$  Ω/km,
- hamowanie pojazdu referencyjnego bez odzysku,
- następstwo tramwajów co 3 min, bez opóźnień.

Z przedstawionych w tabeli 4 danych wynika, że zmiany napięcia na pantografie  $U(t)$  w czasie całego przejazdu mieszczą się w dopuszczalnych przepisami [4] granicach. Napięcie średnie dla całej trasy wynosi 625 V i jest bliskie znamionowemu dla pojazdu (600 V). Minimalna chwilowa wartość napięcia pojawia się w sekcji trzeciej i wynosi 555 V (tab. 1,  $U_{min1} = 400$  V)

W analizowanych okolicznościach widać, że napięcie na wyjściu podstacji jest dobrane w sposób prawidłowy.

Tabela 4

## Wartości napięć średnich i minimalnego dla przebiegu $U(t)$ wg rys. 5

Wartość napięcia	Sekcja							
	1	2	3	4	5	6	7	8
średniego na sekcji [V]	621	619	613	610	638	630	633	644
średniego na trasie [V]	625							
minimalnego na trasie [V]	555 (występuje w sekcji trzeciej)							

Kolejny przypadek to sytuacja, gdzie uwzględniono hamowanie z odzyskiem pojazdów na trasie przy zachowaniu pozostałych danych bez zmian.

Tabela 5

## Wartości średnie napięć na sekcjach oraz wartość maksymalna i minimalna napięcia dla przebiegu $U(t)$ wg rys. 6

Wartość napięcia	Sekcja							
	1	2	3	4	5	6	7	8
średniego na sekcji [V]	633	623	634	617	644	640	636	655
średniego na trasie [V]	634							
maksymalnego na trasie [V]	731 (występuje w sekcji trzeciej)							
minimalnego na trasie [V]	566 (występuje w sekcji trzeciej)							

Z przedstawionych w tabeli 5 danych wynika, że średnia wartość napięcia na odbieraku dla całego przejazdu wynosi 634 V, czyli zwiększyła się o 9 V (w stosunku do poprzedniego przejazdu). Maksymalna chwilowa wartość napięcia wyniosła 731 V (w sekcji trzeciej). Napięcie to było wyższe o 11 V od  $U_{max1} = 720$  V (tab. 1) [4], niższe jednak niż  $U_{max2} = 770$  V. Widać, że w danym przypadku napięcie na odbieraku mieści się w granicach wynikających z normy [D].

W trzecim prezentowanym przypadku przyjęto:

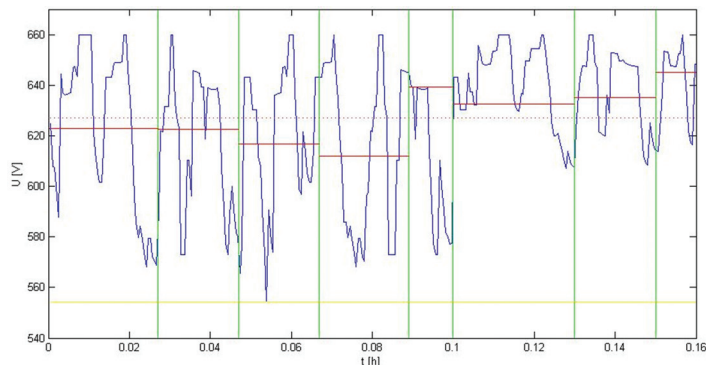
- $U_N = 720$  V,
- $R_p = 12$  m $\Omega$ ,
- $R_{sj} = 0,0490$   $\Omega$ /km,
- $R_{sz} = 0,00594$   $\Omega$ /km,
- hamowanie pojazdu referencyjnego, jak i pozostałych na trasie, bez odzysku,
- następstwo tramwajów co 3 min,
- bez opóźnień.

Tabela 6

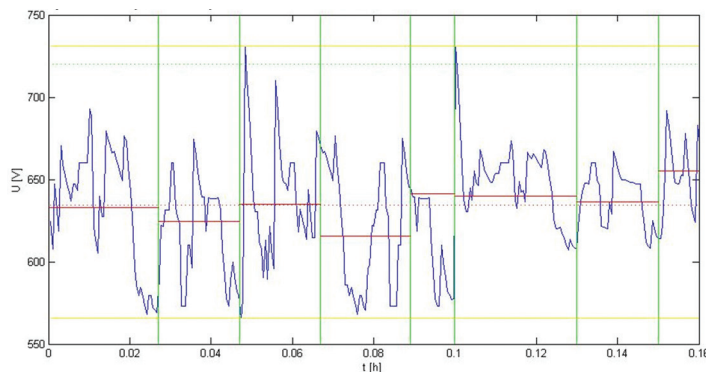
## Wartości napięć średnich i minimalnego dla przejazdu $U(t)$ wg rys. 7

Wartość napięcia	Sekcja							
	1	2	3	4	5	6	7	8
średniego na sekcji [V]	683	683	677	672	699	692	695	705
średniego na trasie [V]	687							
minimalnego na trasie [V]	614 (występuje w sekcji trzeciej)							

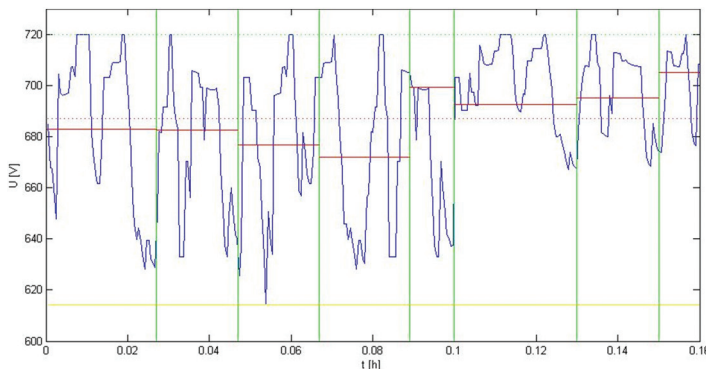
Z przedstawionych w tabeli 6 danych wynika, że zmiany napięcia na pantografie  $U(t)$  w czasie całego przejazdu mieszczą się w dopuszczalnych przepisami [4] granicach. Napięcie średnie dla całej trasy wynosi 687 V i jest większe od znamionowego o 87 V. Minimalna chwilowa wartość napięcia pojawia się w sekcji trzeciej i wynosi 614 V.



Rys. 5. Przebieg napięcia  $U(t)$  dla następnstwa tramwajów co 3 min



Rys. 6. Przebieg napięcia  $U(t)$  dla następnstwa tramwajów co 3 min z uwzględnieniem hamowania odzyskowego

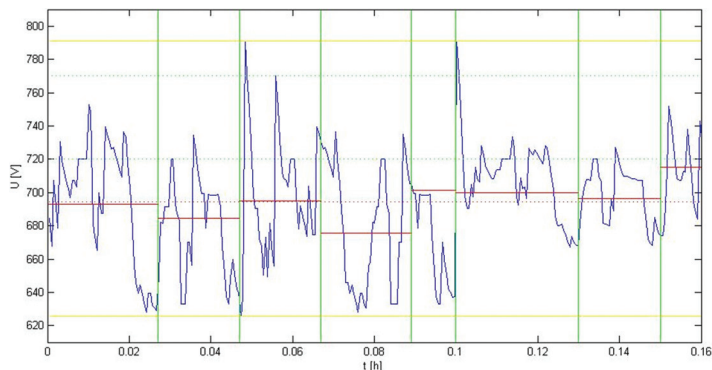


Rys. 7. Przebieg napięcia  $U(t)$  dla następnstwa tramwajów co 3 min

Wynika z tego, że napięcie znamionowe podstacji (720 V) w analizowanym przypadku nie powoduje przekroczeń zakresów wynikających z normy [4]. Można jednak stwierdzić, że mając na uwadze wartość średnią napięcia w każdej sekcji i na całym odcinku, napięcie to jest zbyt wysokie.

W czwartym prezentowanym przypadku przyjęto

- $U_N = 720$  V,
- $R_p = 12$  m $\Omega$ ,
- $R_{sj} = 0,0490$   $\Omega$ /km,
- $R_{sz} = 0,00594$   $\Omega$ /km,
- hamowanie z rekuperacją wszystkich tramwajów na trasie,
- następstwo tramwajów co 3 min,
- bez opóźnień.



Rys. 8. Przebieg napięcia  $U(t)$  dla następstwa tramwajów co 3 min

Tabela 7

**Wartości średnie napięć na sekcjach oraz wartość maksymalna i minimalna napięcia dla przebiegu  $U(t)$  wg rys. 8.**

Wartość napięcia		Sekcja							
		1	2	3	4	5	6	7	8
średniego na sekcji	[V]	693	684	695	675	701	700	696	715
średniego na trasie	[V]	694							
maksymalnego na trasie	[V]	791 (występuje w sekcji trzeciej)							
minimalnego na trasie	[V]	626 (występuje w sekcji trzeciej)							

Z przedstawionych w tabeli 7 danych wynika, że zmiany napięcia na pantografie  $U(t)$  w czasie całego przejazdu mieszczą się ciągle w dopuszczalnych przepisami [4] granicach. Napięcie średnie dla całej trasy wynosi 694 V i jest większe od znamionowego o 94 V. W przypadku sekcji 8 wartość napięcia średniego wynosi 715 V i tylko 5 V brakuje do napięcia  $U_{\max 1} = 720$  V (tab. 1). Wartość napięcia maksymalnego na trasie wynosi 791 V i wyraźnie przekracza  $U_{\max 2} = 770$  V. Wartość minimalna chwilowa napięcia na trasie pojawia się w sekcji trzeciej i wynosi 626 V. Wartość tego napięcia jest większa o 26 V od  $U_N = 600$  V i o 226 V większa od  $U_{\min 1} = 400$  V.

### Uwagi końcowe

We wszystkich analizowanych przypadkach wartość napięcia średniego na odbieraku jest wyższa od wartości napięcia znamionowego (600 V), przedstawionego w normie PN-EN 50163.

Dla przejazdów nowoczesnych tramwajów z rekuperacją wartości napięć średnich, zwłaszcza chwilowych, są wyższe niż dla przejazdów bez rekuperacji.

Zbyt wysoki poziom napięcia wyjściowego na podstacji trakcyjnej może być przyczyną ograniczenia możliwości hamowania odzyskowego tramwajów.

W związku z tym, jeśli na projektowanej linii trakcyjnej przewiduje się znaczną liczbę kursowania tramwajów z możliwością hamowania odzyskowego, to należy zwrócić szczególną uwagę na górne dopuszczalne poziomy napięć.

We wszystkich analizowanych przypadkach (zaprezentowanych i nie zaprezentowanych) nie pojawiła się kwestia zbyt niskiego napięcia na pojeździe referencyjnym.

Niewielkie wahania wartości napięcia średniego w rozważanych przypadkach wskazują na to, że układ zasilania jest zaprojektowany poprawnie.

Przedstawione wyniki wskazują, że problemem jest zbyt wysoki poziom napięcia na odbieraku prądu tramwaju, a nie wartość minimalna tego napięcia. Zaprezentowane wyniki pomiarów wskazują, że nie wszyscy spośród specjalistów z tej dziedziny mają pełną świadomość tego faktu.



### Literatura

- [1] Chrabąszcz I., Prusak J., Drapik S.: *Podręcznik INPE dla elektryków*. Zeszyt 27, INPE w Bełchatowie 2009.
- [2] Czuchra W., Kobielski A., Prusak J.: *Zmienność napięcia w tramwajowej sieci trakcyjnej – próba oceny metodą statystyczną*. XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa z zakresu Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, 21–23 października 2004, Kraków – Zakopane, s. 145–150.
- [3] Czuchra W., Prusak J., Zajęc W.: *Tramwaje z napędem asynchronicznym – ocena energochłonności*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2006, s. 66–68, 72.
- [4] PN-EN-50163:1995 *Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilające systemów trakcyjnych*.
- [5] PN-EN 50388:2008: *Zastosowania kolejowe. System zasilania i tabor. Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności*.
- [6] Kałuża E., Bartodziej G., Ginalski Z.: *Układy zasilania i podstacje trakcyjne*. Politechnika Śląska, skrypt uczelniany nr 1220, Gliwice 1985.
- [7] Mierzejewski L., Szelaąg A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
- [8] *Dokumentacja projektowa podstacji tramwajowej nr 13 „Konarskiego”*. ZIKIT w Krakowie.
- [9] [www.mpk.krakow.pl](http://www.mpk.krakow.pl)
- [10] *Karta katalogowa NGT6*. MPK Kraków.

Ireneusz Chrabąszcz, Janusz Prusak  
 Politechnika Krakowska, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem

Mateusz Potempa  
 absolwent Politechniki Krakowskiej, specjalności Inżynieria Elektryczna w Transporcie