Mikołaj Bartłomiejczyk, Zygmunt Giętkowski

Maksymalne prądy obciążenia w trakcji trolejbusowej

W ostatnich kilku latach nastąpiła rozbudowa sieci trolejbusowej w Gdyni, Lublinie i Tychach. Planowana jest budowa kolejnych tras. Wraz z rozwojem trakcji trolejbusowej, coraz większego znaczenia nabiera zagadnienie prawidłowego wymiarowania elementów trolejbusowego układu zasilania.

Od ponad 20 lat obserwuje się zwiększone zainteresowanie trolejbusem, jako perspektywicznym środkiem transportu miejskiego. Wiąże się to z wpływem transportu na środowisko naturalne oraz z postępującą destabilizacją rynku paliw płynnych. Także w Polsce, po niekorzystnych dla trolejbusu latach 90. XX w., nastąpiła znaczna poprawa w postrzeganiu trakcji trolejbusowej [2].

W ostatnich latach, wraz ze stopniową modernizacją sieci trolejbusowych, rozpoczęto eksploatację trolejbusów wyposażonych w nowoczesne napędy falownikowe dużej mocy. Trolejbusy takie cechują się dużym chwilowym poborem prądu z sieci trakcyjnej, a także większymi – w stosunku do dotychczas eksploatowanych trolejbusów – wymaganiami dotyczącymi stabilności zasilania. W związku z tym, coraz częściej pojawiają się problemy z wydajnością istniejących układów zasilania. To powoduje konieczność wzmacniania tych układów. Buduje się również nowe linie trolejbusowe.

Projektanci nowych układów zasilania trakcji trolejbusowej stają więc przed zagadnieniem prawidłowego zwymiarowania układu zasilania. Wbrew pozorom nie jest to zadanie proste. Komunikacja trolejbusowa – pod wieloma względami – znacznie odbiega swoimi parametrami od komunikacji szynowej. Zastosowanie w trakcji trolejbusowej metod obliczeniowych, powszechnie stosowanych w trakcji tramwajowej, może doprowadzać do błędnych wyników obliczeń.

Najstarszą grupą metod analizy układów zasilania trakcji miejskiej są metody analityczne, w których – na podstawie danej częstotliwości kursowania, parametrów taboru i linii, przy użyciu analitycznych wzorów obliczeniowych – wyznacza się obciążenia zasilaczy i spadki napięć. Zasadniczą wadą metod analitycznych jest mała dokładność obliczeń, wynikająca z braku możliwości uwzględnienia w nich specyficznych, zmiennych warunków ruchu drogowego, takich jak np. sygnalizacja świetlna czy technika jazdy kierowców. Alternatywą dla metod analitycznych są symulacyjne metody analizy, których rozwój rozpoczął się wraz z rozpowszechnieniem się cyfrowych maszyn obliczeniowych. Metody symulacyjne są obecnie najbardziej precyzyjnym narzędziem obliczeniowym i stale trwają prace nad ich udoskonalaniem [3]. Jednakże wadą modelowania komputerowego jest bardzo duży nakład pracy towarzyszący temu procesowi. Z tego też powodu, pomimo silnej konkurencji ze strony metod symulacyjnych, metody analityczne są nadal bardzo powszechnie stosowane w środowisku inżynierskim i zainteresowanie nimi, a zwłaszcza ich efektywnością obliczeniową, jest w pełni uzasadnione.

Zasady projektowania układów zasilania

Trolejbusy są pojazdami bezszynowymi, a co za tym idzie, trolejbusowa sieć trakcyjna (napowietrzna) pełni zarówno rolę sieci jezdnej jak i powrotnej. Składa się ona z dwóch równoległych przewodów jezdnych, zawieszonych standardowo na wysokości 5,5 m nad poziomem jezdni. Zwykle przewód prawy dla kierunku jazdy (zewnętrzny) jest przewodem o niższym potencjale, a przewód lewy (wewnętrzny) jest przewodem o wyższym potencjale.

Sieć trakcyjna podzielona jest na odcinki zasilania, które zasilane są – z podstacji trakcyjnych – kablami zasilającymi, tzw. zasilaczami. Podstacje trakcyjne są rozmieszczone co 2–6 km i mają moc w granicach 500 kW–2 MW.

Z punktu widzenia obliczeń energetycznych, należy zwrócić uwagę na następujące charakterystyczne cechy komunikacji trolejbusowej:

- duża nierównomierność ruchu pojazdów spowodowana kongestią ruchu drogowego, w efekcie czego często występują zgrupowania pojazdów, tzw. „jazda stadami"; również drogowa sygnalizacja świetlna przeważnie nie jest dostosowana do potrzeb komunikacji miejskiej i niejednokrotnie sama powoduje gromadzenie się wielu trolejbusów w jednym miejscu;
- relatywnie niski poziom wykształcenia i kultury pracy wśród kierowców trolejbusowych, w wyniku czego często stosowana jest nieodpowiednia technika jazdy w stosunku do istniejących warunków;
- większa rezystancja trolejbusowej sieci zasilającej od sieci trakcyjnej w komunikacji szynowej (przewód powrotny w trakcji trolejbusowej ma większą rezystancję jednostkową niż szyna kolejowa lub tramwajowa);
- stosunkowo nieduża liczba pojazdów znajdujących się jednocześnie na odcinku zasilania (1–3), w wyniku czego występuje duża nierównomierność obciążenia zasilacza.

Z wymienionych właściwości wynika, że obciążenie trolejbusowych podstacji trakcyjnych ma charakter losowy. W związku z tym, stosowanie powszechnie przyjętych w trakcji kolejowej metod, zakładających poruszanie się pojazdów ściśle według zadanego rozkładu jazdy, może prowadzić do znacznych błędów. Konieczne staje się więc zastosowanie metod statystycznych, w których należy uwzględnić następujące cztery zasadnicze elementy [1,7]:

- średni godzinny prąd zasilacza; na podstawie tej wielkości wyznaczany jest maksymalny chwilowy prąd zasilacza, a także wymiarowane są zespoły prostownikowe podstacji trakcyjnej;
- maksymalny chwilowy prąd zasilacza; wielkość tego prądu wymusza nastawy podstacyjnych wyłączników szybkich i – w sposób pośredni – określa maksymalne chwilowe spadki napięcia w sieci trakcyjnej;
- minimalna wielkość prądu zwarcia w sieci trakcyjnej; trolejbusowa sieć trakcyjna cechuje się stosunkowo dużą rezystancją, a co za tym idzie, prądy zwarcia mają relatywnie małe wielkości, co z kolei utrudnia dobór właściwych nastaw prądowych

wyłączników zasilaczy, tj. nastaw umożliwiających niezawodną pracę układu zasilania i zapewniających wyłączalność zwarć w sieci trakcyjnej;

- maksymalny chwilowy spadek napięcia w sieci trakcyjnej; jak pokazuje praktyka [1,5], to ten spadek napięcia, wynikający z dużej nierównomierności ruchu oraz z dużej rezystancji sieci trakcyjnej, jest czynnikiem limitującym układ zasilania; w obliczeniach często pomija się wyznaczenie tego elementu, co niejednokrotnie prowadzi do znacznych błędów; wielkość maksymalnego chwilowego spadku napięcia wyznacza się najczęściej na podstawie chwilowego maksymalnego prądu zasilacza.

W praktyce wyznacza się także średnią wielkość spadku napięcia w sieci trakcyjnej, jednakże – ze względu na małą liczbę pojazdów znajdujących się na odcinku zasilania oraz wspominaną nierównomierność ruchu – kryterium to jest obarczone znacznym błędem.

Reasumując, kluczowym elementem obliczeń układu zasilania jest wyznaczenie maksymalnego chwilowego prądu zasilacza.

Metody wyznaczania maksymalnych prądów obciążenia

W przypadku małej liczby trolejbusów znajdujących się jednocześnie na odcinku zasilania (1–3 pojazdy), wielkość maksymalnego chwilowego prądu zasilacza (I_{max}) można wyznaczyć ze wzoru [1]:

$$I_{max} = I_{rt} \cdot N \qquad (1)$$

gdzie:

I_{rt} – wielkość prądu rozruchowego trolejbusu (w przypadku trolejbusu Solaris Trollino 12 AC, wyposażonego w trakcyjny silnik asynchroniczny o mocy 175 kW, prąd rozruchowy można przyjąć na poziomie 350 A),

N – liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania.

Jest to tzw. metoda równoczesnego rozruchu pojazdów.

Modyfikacją tej metody jest metoda McDonalda [6], w której maksymalny prąd obciążenia wyznacza się ze wzoru:

$$I_{max} = \left[I_{śrt} + (I_{rt} - I_{śrt}) \cdot 0{,}82^{\frac{N-1}{z}} \right] \cdot N \qquad (2)$$

gdzie:

$I_{śrt}$ – wielkość prądu średniego trolejbusu [A],

I_{rt} – wielkość prądu rozruchowego trolejbusu [A],

N – liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania,

z – liczba zatrzymań na 1 km jazdy.

Bardziej dokładna jest metoda Rozenfelda [1], w której wielkość I_{max} wyznacza się ze wzoru:

$$I_{max} = I_{śr} \cdot k_s \qquad (3)$$

gdzie:

$I_{śr}$ – wielkość średnia prądu obciążenia odcinka zasilania [A],

k_s – współczynnik szczytu, równy stosunkowi maksymalnego chwilowego prądu obciążenia odcinka zasilania do jego wielkości średniej, liczony według (4):

$$k_s = 1 + \frac{3{,}7\sqrt{\beta}}{N} + \frac{3{,}7(\gamma + 2)}{2\beta N} \qquad (4)$$

gdzie:

N – liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania.

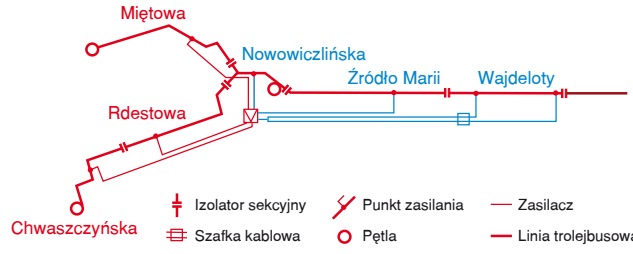
Współczynniki γ i β przyjmują najczęściej wielkości odpowiednio 1 i 4 [5].

Jak pokazano, jest wiele metod wyznaczania maksymalnego prądu obciążenia. Problematyczny jest więc wybór właściwiej metody. Przeprowadzono zatem analizę porównawczą metod obliczeniowych. Podstawą oceny tych metod były wyniki pomiarów przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym.

Pomiary prądów obciążenia

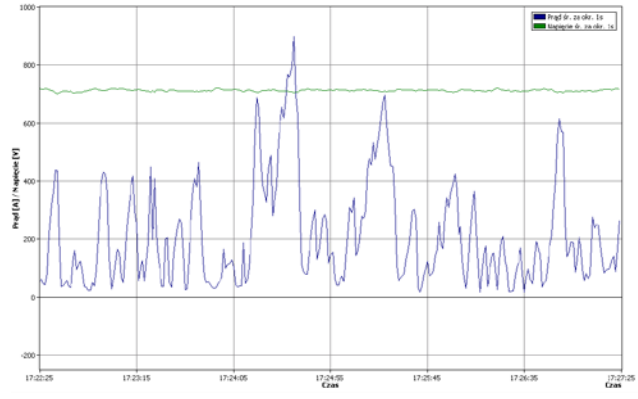
Pomiary zostały przeprowadzone w podstacji Chwaszczyńska, znajdującej się w Gdyni. Jednokreskowy schemat obszaru zasilania tej podstacji przedstawiono na rysunku 1. Dokonano rejestracji prądów trzech sąsiadujących ze sobą zasilaczy – Nowowiczlińska, Źródło Marii i Wajdeloty (rys. 1 – kolor niebieski). Długość każdego z odcinków, zasilanych przez te zasilacze, wynosi ok. 1,5 km.

Pomiarów dokonano w lutym i lipcu 2007 r. Do rejestracji pomiarów wykorzystano sterowniki CZAT 3000 plus, które są wyposażone w czytnik kart pamięci SD i współpracują z przetwornikiem prądu i napięcia HVM, zastępującym odpowiednio klasyczny bocznik pomiarowy i posobnik.



Rys. 1. Jednokreskowy schemat obszaru zasilania podstacji Chwaszczyńska

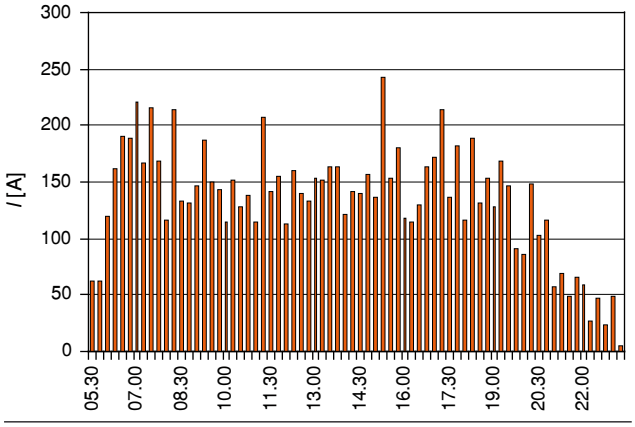
Po zainstalowaniu stosownego oprogramowania możliwy jest zapis danych pomiarowych, uzyskanych z przetwornika HVM, do karty SD. Takie oprogramowanie zostało zainstalowane na podstacji Chwaszczyńska. Dokonywana była rejestracja prądu zasilacza i napięcia szyn zbiorczych, uśrednianych w cyklach jednosekundowych. Na rysunku 2 przedstawiono fragment rejestracji prądu zasilacza Nowowiczlińska.



Rys. 2. Przykładowa rejestracja prądu zasilacza Nowowiczlińska

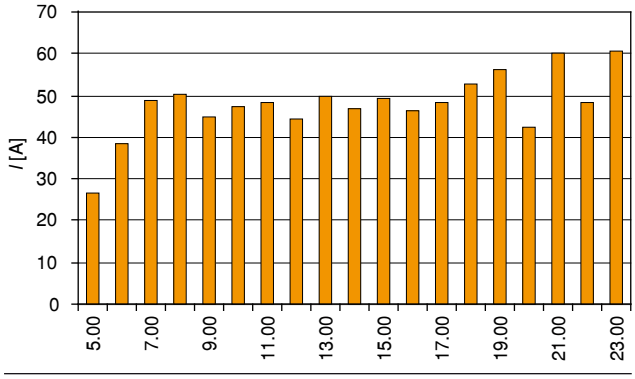
Na rysunku 3 przedstawiono przebieg średniego prądu 15-minutowego w czasie dnia roboczego. W godzinach poranne-

go szczytu przewozowego (6.20–7.30) widoczne jest zwiększenie prądu zasilacza. Po tym czasie, aż do godziny 18.00, na analizowanym odcinku trolejbusy kursują ze stałą częstotliwością. Należy więc tu zwrócić uwagę na dużą nierównomierność obciążenia zasilacza, wyrażoną stosunkiem maksymalnego średniego prądu 15-minutowego do średniego prądu jednogodzinnego, która w analizowanym przypadku wynosi 1,65. W trakcji tramwajowej nierównomierność prądu zasilacza wynosi 1,2–1,3 [3].



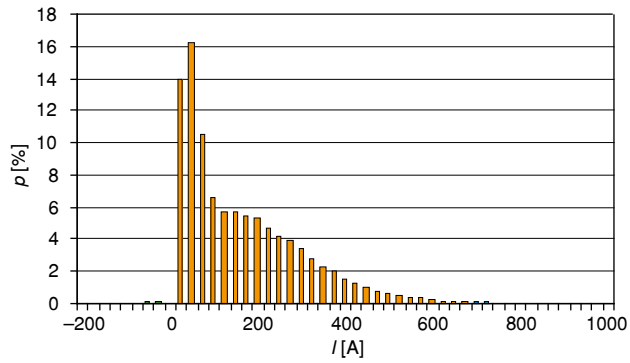
Rys. 3. Przebieg średniego prądu 15-minutowego zasilacza Nowowiczlińska w ciągu dnia roboczego

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg średniego jednogodzinnego prądu trolejbusu w ciągu dnia roboczego, wyznaczony na podstawie pomierzonego prądu zasilacza oraz średniej liczby pojazdów, znajdujących się na odcinku zasilania (pomiarów dokonano w lipcu 2007 r.). Wartość tego prądu zmienia się w ciągu dnia, co jest efektem wpływu zmiennych warunków ruchu drogowego. Jest to bardzo istotne spostrzeżenie, gdyż w licznych metodach obliczeniowych wielkości maksymalne prądu zasilacza i spadku napięcia w sieci trakcyjnej wyznacza się na podstawie średniego prądu zasilacza. W związku z tym przyjęcie stałej wielkości średniego prądu trolejbusu prowadzi do błędów w obliczeniach.

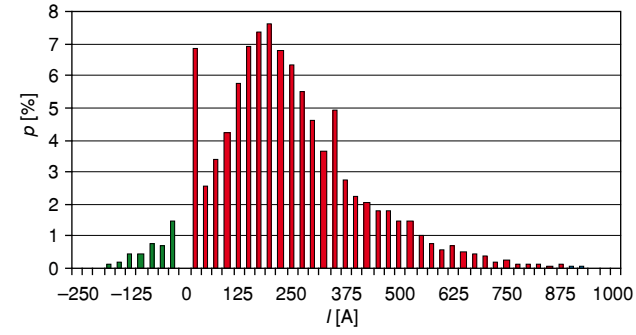


Rys. 4. Przebieg średniego jednogodzinnego prądu trolejbusu w ciągu dnia roboczego

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono histogramy prądów zasilaczy Nowowiczlińska i Wajdeloty. Odcinek Nowowiczlińska jest odcinkiem płaskim, o relatywnie trudnych warunkach ruchu, natomiast odcinek Wajdeloty cechuje się znacznym maksymalnym nachyleniem poziomym jezdni (8%). W związku z tym na obszarze odcinka zasilania Nowowiczlińska dominuje jazda z częstymi, krótkimi, ponownymi rozruchami, a na odcinku Wajdeloty jazda ze stałą prędkością. Różnice w technice jazdy na obydwu odcinkach mają odzwierciedlenie w kształcie histogramów (rys. 5, 6).



Rys. 5. Histogram prądu zasilacza Nowowiczlińska (p – prawdopodobieństwo wystąpienia określonej wielkości prądu)



Rys. 6. Histogram prądu zasilacza Wajdeloty (kolorem czerwonym oznaczono dodatnie wielkości prądu zasilacza, kolorem zielonym – ujemne)

Innym parametrem, wyznaczonym na podstawie wyników pomiarów, jest względny czas przepływu prądu o ujemnej wielkości. Wynosi on przykładowo dla odcinka:

- zasilania Nowowiczlińska w trakcie dnia roboczego – 0,3%,
- zasilania Nowowiczlińska podczas dnia wolnego od pracy – 1%,
- Wajdeloty w trakcie dnia roboczego – 2%.

Obecnie 20% taboru trolejbusowego, eksploatowanego w Gdyni, ma hamowanie odzyskowe. Na podstacjach trakcyjnych nie ma urządzeń, umożliwiających gromadzenie lub zwrot do sieci energii hamowania, więc może ona być wykorzystana jedynie poprzez inne trolejbusy będące w ruchu. Prąd hamowania odzyskowego może płynąć dwoma drogami: z hamującego trolejbusu, poprzez sieć trakcyjną do innego pojazdu lub z hamującego trolejbusu poprzez sieć trakcyjną, zasilacz, szyny zbiorcze podstacji do sieci trakcyjnej innego odcinka zasilania. Pierwszy przypadek ma miejsce, gdy pojazd hamujący i odbierający energię znajdują się na jednym odcinku zasilania – a drugi, gdy pojazdy znajdują się na różnych odcinkach zasilania. Przy dużej gęstości ruchu pojazdów główny udział w hamowaniu odzyskowym ma pierwsza droga przepływu prądu, natomiast – wraz ze zmniejszaniem się liczby trolejbusów znajdujących się jednocześnie na odcinku zasilania – zwiększa się udział drugiej drogi przypływu prądu. Potwierdzają to wyniki pomiaru prądu w zasilaczu Nowowiczlińska. W dni robocze czas przepływu prądu ujemnej wielkości w tym zasilaczu jest ponad trzykrotnie mniejszy niż w niedzielę.

Spośród trzech analizowanych przypadków względny czas przepływu prądu ujemnego był najdłuższy w zasilaczu Wajdelota.

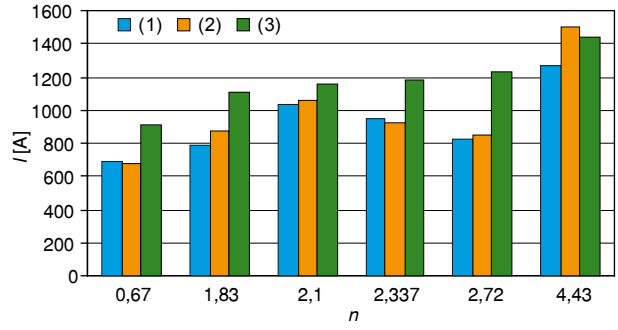
Wynika to ze znacznego nachylenia podłużnego jezdni na tym odcinku zasilania. Efektem tego jest relatywnie duża efektywność odzysku energii podczas hamowania. Widoczne jest to także na histogramie obciążenia zasilacza Wajdeloty (rys. 6).

Ocena metod statystycznych

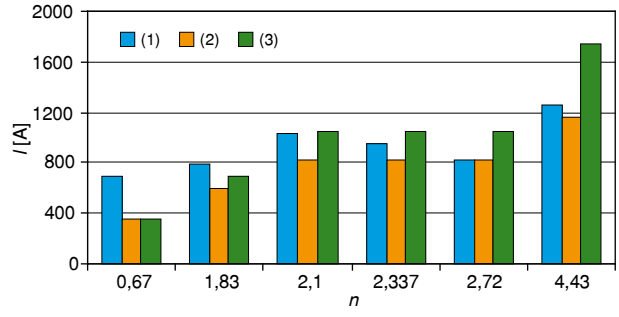
Na podstawie wykonanych rejestracji (w lutym i lipcu 2007 r.), wyznaczono maksymalne chwilowe wielkości prądów zasilaczy. Za [4] przyjęto graniczny poziom prawdopodobieństwa przekroczenia wielkości maksymalnej na poziomie 10^{-4}, czyli kwantyl rozkładu prądu zasilacza rzędu 0,9999 (co odpowiada jednemu przekroczeniu wyznaczonej wielkości maksymalnej prądu na kilka godzin). Uzyskane tym sposobem dane pomiarowe porównano z maksymalnymi prądami zasilaczy, wyznaczonymi następującymi metodami analitycznymi:

- metodą Rozenfelda, w której wielkość współczynnika szczytu wyznaczono analitycznie, a średni prąd zasilacza został przyjęty na podstawie pomiarów;
- metodą Rozenfelda, w której zarówno wielkość współczynnika szczytu, jak i wielkość średniego prądu zasilacza wyznaczono analitycznie;
- metodą McDonalda;
- metodą równoczesnego rozruchu trolejbusów.

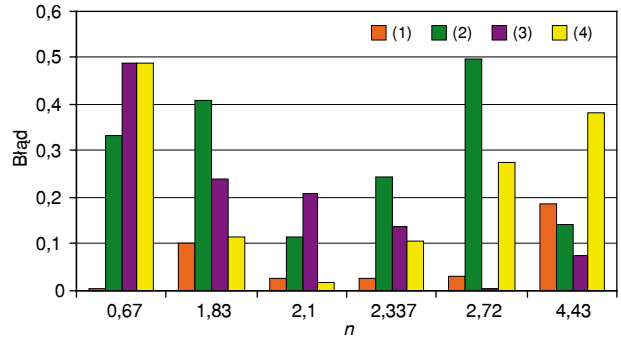
Porównanie wymienionych metod przedstawiono na rysunkach 7–9.



Rys. 7. Porównanie wielkości maksymalnych prądu zasilacza wyznaczonych metodą Rozenfelda z wielkościami zmierzonymi; I – prąd maksymalny zasilacza, n – liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania, 1 – wyniki pomiarów, 2 oraz 3 – wielkości wyznaczone metodą Rozenfelda (2 – średni prąd zasilacza przyjęto na podstawie pomiarów, 3 – średni prąd zasilacza wyznaczono analitycznie)



Rys. 8. Porównanie wielkości maksymalnych prądu zasilacza wyznaczonych metodą McDonalda (2) oraz metodą równoczesnych rozruchów (3) z wielkościami zmierzonymi (1); I – prąd maksymalny zasilacza, n – liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania

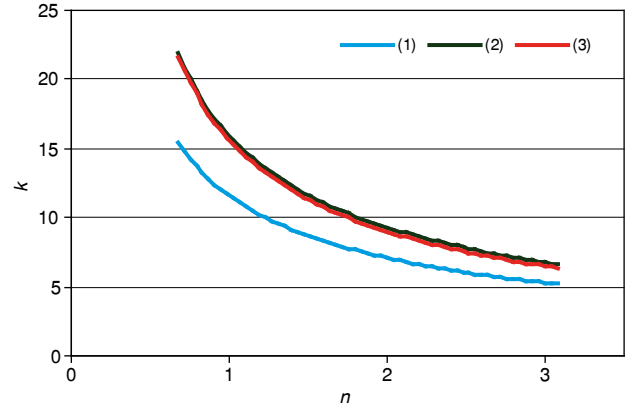


Rys. 9. Porównanie względnych błędów metod wyznaczania maksymalnego prądu zasilacza (poziomem odniesienia jest prąd pomierzony); (1) metoda Rozenfelda, prąd średni zasilacza przyjęto na podstawie pomiarów, (2) metoda Rozenfelda, prąd średni zasilacza wyznaczono analitycznie, (3) metoda McDonalda, (4) metoda równoczesnych rozruchów trolejbusów, n – liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w znacznym stopniu o dokładności wyniku w metodzie Rozenfelda decyduje dokładność wyznaczenia średniego prądu zasilacza (rys. 7). Maksymalna niedokładność oszacowania prądu maksymalnego, wykonanego na podstawie analitycznie wyznaczonego prądu średniego, wyniosła 50%. Natomiast przyjęcie średniego prądu na podstawie pomiarów zmniejszyło ten błąd do 19%.

W przypadku metody McDonalda i metody równoczesnego rozruchu trolejbusów (rys. 9), najmniejszą dokładność uzyskano dla najmniejszej częstotliwości ruchu. Jest to błąd „niebezpieczny", gdyż powoduje on zaniżenie wyznaczonej wielkości prądu maksymalnego, a co za tym idzie, niedowymiarowanie projektowanego układu zasilania. Jak pokazuje praktyka, taka sytuacja ma często miejsce.

Na rysunku 10 porównano wielkości współczynnika szczytu uzyskane analityczną metodą Rozenfelda z wielkościami wyznaczonymi na podstawie pomiarów (pomiary wykonano w lutym i lipcu 2007 r.). Należy zwrócić uwagę na znaczną zbieżność tych wielkości (krzywa *2* i *3*). Największa różnica między wielkościami analitycznymi i empirycznymi wyniosła 19%. W literaturze często podaje się, że metodę Rozenfelda można stosować przy co najmniej pięciu pojazdach znajdujących się na odcinku zasilania [4]. Jednakże uzyskane dane pomiarowe wskazują na dużą dokładność tej metody – również wtedy, gdy warunek ten nie jest spełniony.



Rys. 10. Porównanie wielkości współczynnika szczytu (k) wyznaczonych na podstawie pomiarów w zimie (1) i w lecie (2) z wielkościami wyznaczonymi metodą Rozenfelda (3), n – średnia liczba trolejbusów znajdujących się na odcinku zasilania

Różnica między empirycznymi wielkościami współczynnika szczytu dla okresu zimowego i letniego (krzywa *1* i *2*) wynika z poboru prądu na cele grzewcze w zimie. Prąd ten ma stałą wielkość podczas jazdy trolejbusu i w związku z tym zwiększa on o tę samą wielkość zarówno średni, jak i maksymalny prąd zasilacza. Efektem tego jest zmniejszenie wielkości współczynnika szczytu w zimie.

Wnioski

Na podstawie omówionej analizy można wysunąć pewne istotne wnioski, dotyczące zakresu stosowalności poszczególnych metod.

1. Wprawdzie metoda Rozenfelda jest metodą najbardziej precyzyjną, jednakże dokładność tej metody w dużym stopniu zależy od dokładności wyznaczenia średniego prądu zasilacza. Zastosowanie tabelarycznych danych, dotyczących energochłonności taboru, pozwala uzyskać dokładność wyznaczania wielkości średniego prądu na poziomie 20–30 %. Dlatego też, celem uzyskania większej dokładności, należy wyznaczyć ten prąd na podstawie danych pomiarowych (uzyskanych w analogicznych warunkach ruchowych) lub na podstawie wykonanego przejazdu teoretycznego [1].

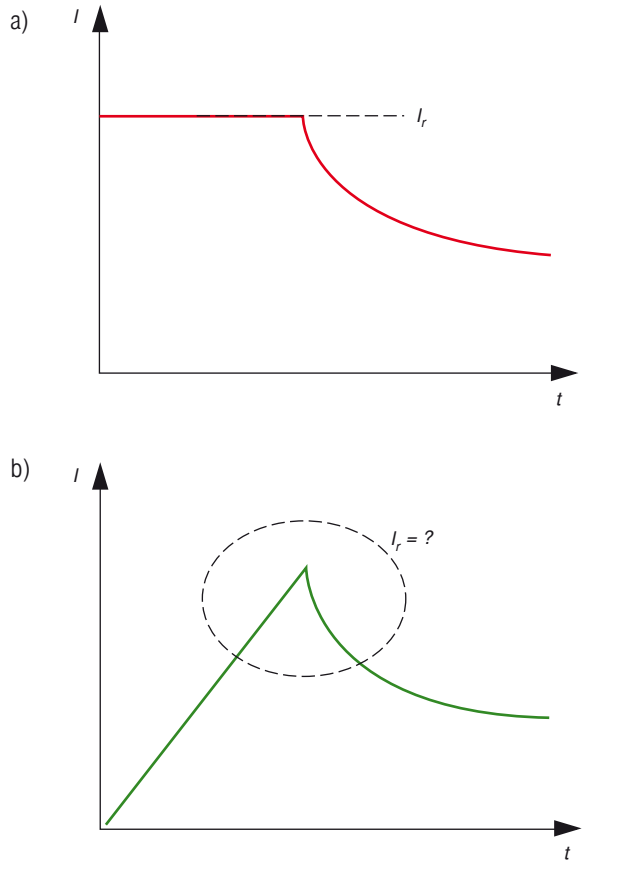
2. Podstawową zaletą metody McDonalda jest prostota obliczeń. Jednakże w przypadku taboru ze sterowaniem energoelektronicznym, problemem jest wyznaczenie wielkości prądu rozruchowego trolejbusu, pobieranego z sieci trakcyjnej. Czynnik ten może być źródłem znacznego błędu. Trolejbus, wyposażony w rezystorowy układ rozruchowy, pobiera z sieci w przybliżeniu stałą wielkość prądu aż do momentu rozpoczęcia jazdy na charakterystyce naturalnej silnika (rys. 11). Właśnie tę stałą wielkość prądu przyjmuje się do obliczeń. Natomiast prąd, pobierany z sieci przez trolejbus z energoelektronicznym układem sterowania silnikiem, zmienia się w czasie. W efekcie tego występują trudności z przyjęciem do obliczeń konkretnej wielkości prądu I_{rt} we wzorze (2).

Metoda równoczesnego rozruchu trolejbusów jest metodą mającą zastosowanie przy wstępnym szacowaniu maksymalnego prądu obciążenia, gdy na odcinku zasilania znajdują się średnio 2–4 pojazdy. Jednak metoda ta jest obarczona dużym błędem. Analogicznie jak w metodzie McDonalda, problemem jest niejednoznaczność określenia prądu rozruchowego trolejbusu.

Metody McDonalda i równoczesnego rozruchu trolejbusów generują znaczny błąd w przypadku niewielkiej liczby trolejbusów znajdujących się w ruchu (np. jeden pojazd). Błąd ten wynika ze znacznej nierównomierności ruchu i możliwości występowania tzw. jazdy stadami. Z tego powodu do obliczeń nie powinno się przyjmować liczby pojazdów mniejszej od dwóch.

Artykuł nie wyczerpuje poruszanego zagadnienia, jednak może stanowić istotną pomoc dla inżynierów praktyków przy wyborze metod obliczeniowych trolejbusowego układu zasilania.

❑



Rys. 11. Ilustracja problemu związanego z niejednoznacznością określania wielkości prądu rozruchowego I_{rt} w metodzie McDonalda według (2); uproszony przebieg prądu pobieranego z sieci przez trolejbus z rozruchem rezystorowym (a) i energoelektronicznym (b)

Literatura

[1] Bartłomiejczyk M.: *Budowa i metodyka obliczeń trolejbusowego układu zasilania* (praca magisterska). Politechnika Gdańska, Gdańsk 2007.

[2] Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Uwarunkowania funkcjonowania i rozwoju komunikacji trolejbusowej w Gdyni*. Konferencja „Komunikacja miejska warunkiem zrównoważonego rozwoju i konkurencyjności Lublina", Nasutów 2007.

[3] Drążek Z.: *Symulacyjna metoda analizy systemów zasilania elektrycznej trakcji miejskiej prądu stałego* (rozprawa doktorska). Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.

[4] Mierzejewski L., Szeląg A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Skrypt PW, Warszawa 1989.

[5] Тарнижевский М. В., Томлянович Д. К.: *Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса*. Транспорт, Москва 1986.

[6] Podivín L.: *Metodika energetických výpočtů* (opracowanie niepublikowane). Pardubice.

[7] *Komplexní výpočet napájecí sítě městské hromadné dopravy*. Zavěrečná zpráva V –18 – 70., Ústav silniční a městské dopravy, Praga 1970.

Autorzy

mgr inż. Mikołaj Bartłomiejczyk, e-mail: mbartlom@ely.pg.gda.pl;

dr inż. Zygmunt Giętkowski, e-mail: z.gietkowski@ely.pg.gda.pl;

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Zakład Trakcji Elektrycznej