

Zofia Wróbel, Robert Ziemia, Mariusz Gamracki

Szacowanie zagrożenia piorunowego sieci trakcyjnych

Sieci trakcyjne obejmują swoim zasięgiem znaczne obszary i podobnie jak inne obiekty naziemne, znajdując się na otwartej przestrzeni narażone są na oddziaływanie wyładowań atmosferycznych. Narażenie to może być w postaci bezpośrednich uderzeń piorunów w trację lub w postaci napięć indukowanych wyładowaniami pobliskimi. Liczba wyładowań atmosferycznych trafiających w obiekty naziemne związana jest z powierzchnią, jaką zajmuje obiekt oraz gęstością wyładowań na danym obszarze. Ze względu na wysokość zawieszenia przewodów nad powierzchnią ziemi, sieć trakcyjna zajmuje większą powierzchnię zbierania (powierzchnię ekwiwalentną) A_e , niż by to wynikało z rzeczywistego obszaru zajmowanego przez trację. Zjawisko to jest opisane tak zwaną teorią elektrogeometryczną wykorzystywaną w ochronie odgromowej obiektów [1].

Wykorzystując podejście analityczne lub symulacje komputerowe metodą Monte Carlo [2] z wykorzystaniem generatorów liczb pseudolosowych można na podstawie znajomości rozkładów probabilistycznych parametrów wyładowań atmosferycznych szacować liczbę uderzeń wyładowań atmosferycznych w linię trakcyjną. Uzupełniając taką analizę o deterministycznie wyznaczone przepięcia powodowane udarami piorunowymi można oceniać zagrożenie piorunowe sieci trakcyjnych.

Model elektrogeometryczny

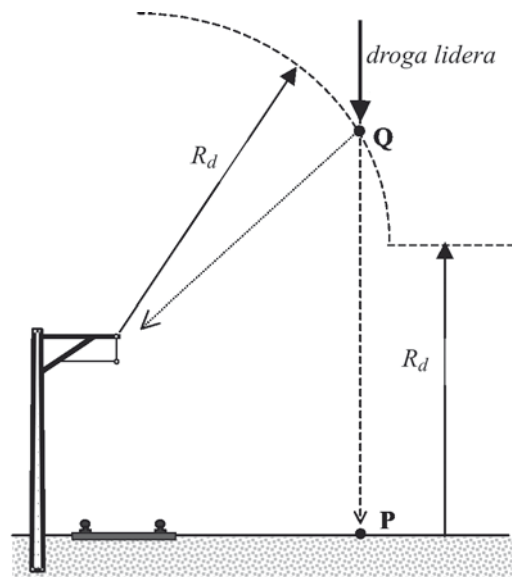
Przy ocenie zagrożenia wywołanego wyładowaniem atmosferycznym wykorzystuje się często tzw. teorię elektrogeometryczną. Opiera się ona na modelu nazywanym modelem elektrogeometrycznym (ang.: *electrogeometric model* – EGM) [1]. W modelu tym dla danej wielkości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego wyznacza się tzw. promień decyzji R_d . Definiowany jest on jako odległość czoła lidera wyładowania od obiektu w chwili „wyboru” miejsca uderzenia. Promień decyzji jest funkcją wielkości szczytowej prądu wyładowania I_m , a ogólna zależność dla obiektów naziemnych podana jest wzorem (1) [1, 3].

$$R_d = kI^p \quad (1)$$

Średnie wielkości współczynników we wzorze (1) wynoszą $k = 9,4$ i $p = 0,67$ [1]. Dla zarejestrowanych wielkości szczytowych prądu piorunowego z przedziału od około 2 kA do 200 kA wielkości promienia decyzji przyjmują wielkości od około 20 m do 300 m. Średnia wielkość promienia decyzji odpowiadająca przeciętnej wielkości prądu piorunowego wynosi około 80 m. Promień decyzji dla powierzchni ziemi przyjmuje się jako równy $0,9 R_d$.

Interpretacja graficzna promienia decyzji dla obiektu liniowego jakim jest sieć trakcyjna przedstawiona jest w przekroju poprzecznym na rysunku 1. Piorun biegnący wzdłuż drogi lidera do

punktu P , przecinając okrąg o promieniu R_d w punkcie Q uderzy w przewód tracji, zamiast w ziemię.



Rys. 1. Interpretacja graficzna modelu elektrogeometrycznego w odniesieniu do tracji elektrycznej

Promień decyzji związany jest z powierzchnią ekwiwalentną A_e obiektu. Podstawę oszacowania powierzchni zbierania wyładowań, a tym samym i wybiórczości trafień piorunowych w obiekt, stanowią zależności wynikające z teorii elektrogeometrycznej. Dla obiektu liniowego o szerokości a , długości b i wysokości h przyjmuje ona zależność [1]:

$$A_e = a \cdot b + 2(a + b) \cdot m \cdot h \quad (2)$$

gdzie współczynnik m oznacza zasięg powierzchni ekwiwalentnej i dla obiektów o wysokości $h \leq 40$ m wyraża się zależnością:

$$m = 13,4 \cdot h^{-0,5} \quad (3)$$

Dla sieci trakcyjnej można pominąć wymiar poprzeczny ($a \approx 0$) i wtedy $A_e \approx 2 \cdot b \cdot m \cdot h$. Przyjmując średnią wysokość zawieszenia przewodu nośnego na poziomie $h = 7$ m, zasięg $m \approx 5$. Dla stukilometrowego odcinka sieci trakcyjnej powierzchnia zbierania wynosi około 7 km^2 . Przy rocznej gęstości wyładowań na kilometr kwadratowy, wynoszącej w Polsce od 1,8 do 2,5 [4] otrzymamy w ocenie ryzyka piorunowego wielkości od ok. 12 do 18 bezpośrednich uderzeń piorunów w stukilometrowy odcinek tracji. Dane takie można przyjmować na obszarze, gdzie linia kolejowa biegnie przez teren odkryty, na którym nie ma pobliskich obiektów mogących ostaniać trację przed bezpośrednim wyładowaniem piorunowym. Wielkości przepięć, wywołane bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi w trację, mogą sięgać nawet kilku megawoltów [10, 11], dlatego stanowią największe zagrożenie, mogące powodować uszkodzenia elementów sieci trakcyjnej.

Zagrożeniem dla sieci trakcyjnych mogą być także wyładowania pobliskie powodujące powstawanie przepięć indukowanych. Mają one zwykle przebieg aperiodyczny lub oscylacyjny tłumiony i osiągają znacznie mniejsze wielkości niż przepięcia wywołane bezpośrednim wyładowaniem linii. Występowanie przepięć indukowanych wyładowaniami pobliskimi zwiększa obszar z którego można oceniać wyładowania atmosferyczne jako niebezpieczne. Wielkość szczytowej napięcia U_{\max} indukowanego w przewodzie nad powierzchnią ziemi można wyznaczyć z uproszczonej zależności [7]:

$$U_{\max} = 38,8 \frac{I_m \cdot h}{Y} \text{ [kV]} \quad (4)$$

gdzie:

I_m – wielkość szczytowa prądu piorunowego [kA],

h – wysokość zawieszenia przewodu nad ziemią [m],

Y – odległość między przewodem a miejscem uderzenia pioruna [m].

Z zależności tej można oszacować strefę zagrożenia wyznaczając wielkość Y przy zadanym poziomie odporności sieci na przepięcia dla danej wielkości szczytowej prądu piorunowego. Przykładowo dla poziomu odporności na przepięcia krótkotrwałe wynoszącą około 14 kV [8] i wielkości szczytowej prądu $I_m = 200$ kA otrzymamy wielkość Y wynoszącą 3 km. Dla takiej wielkości Y obszar, z którego wyładowania mogą być niebezpieczne dla trakcji, przy długości linii $b = 100$ km wynosi $(2 \times 3 \text{ km}) \times 100 \text{ km} = 600 \text{ km}^2$. Można zatem oszacować, że w ciągu roku 100-kilometrowy odcinek trakcji narażony jest na 1000 do 1500 wyładowań. Podane wielkości oszacowane są dla wielkości szczytowej prądu piorunowego, której prawdopodobieństwo wystąpienia jest bardzo małe. Przyjmując do oszacowania średnią wielkość szczytową prądu piorunowego, równą 25 kA [1], otrzymamy 140 do 190 wyładowań.

Rozkłady prawdopodobieństwa parametrów wyładowań atmosferycznych

Parametrami wyładowania atmosferycznego, związanymi z przebiegiem czasowym prądu piorunowego, są: wielkość szczytowa prądu – I_m , maksymalna stromość narastania prądu – S_m oraz czas trwania czoła i czas do półszczytu – τ_1 i τ_2 . Parametrami opisującymi wybiórczość miejsc uderzeń piorunów są: kąt zejścia lidera wyładowania – φ i punkt uderzenia wyładowania na powierzchni ziemi – $P(x, y)$.

Jako rozkłady prawdopodobieństwa parametrów elektrycznych wyładowania atmosferycznego przyjmowane są głównie rozkłady logarytmo-normalne opisane zależnością:

$$g(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(X) - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

gdzie:

$\mu = \ln(X_{50\%})$ – wielkościami średnia;

$\sigma = \ln\left(\frac{X_{16\%}}{X_{50\%}}\right)$ – odchylenie standardowe parametru X , którego przekroczenie jest prawdopodobne odpowiednio w 50% i 16% przypadków.

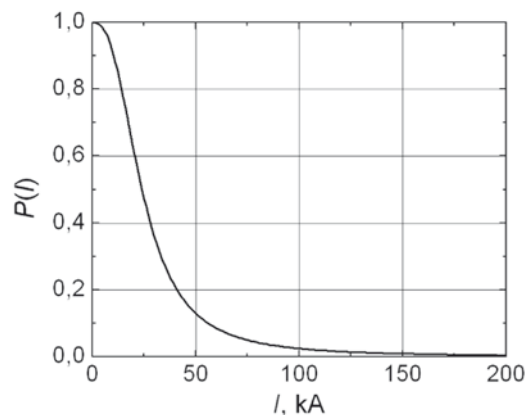
Zmienna losowa X odpowiada parametrom I_m , S_m , Q , τ_1 , τ_2 . Dla kąta zejścia lidera wyładowania φ przyjmowany jest rozkład

postaci $g(\varphi) = 2 \cdot \cos^2(\varphi)$, a dla położenia punktu $P(x, y)$ – rozkład równomierny.

Dystrybuanta przekroczenia określonej wielkości szczytowej prądu piorunowego aproksymowana jest zależnością [3]

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{24}\right)^{2,6}} \quad (6)$$

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg dystrybuanty danej wzorem (6). Widać na nim bardzo małe prawdopodobieństwo występowania wyładowań atmosferycznych o wielkości szczytowej prądu większej od 100 kA.



Rys. 2. Dystrybuanta rozkładu wielkości szczytowej prądu piorunowego

Znajomość rozkładów prawdopodobieństwa parametrów wyładowań piorunowych może posłużyć do szacowania na drodze analitycznej zagrożeń wywołanych uderzeniami piorunów w obiekty naziemne. Innym sposobem szacowania jest podejście numeryczne z wykorzystaniem metody Monte Carlo [2]. W metodzie tej szacowanie powierzchni ekwiwalentnej A_e polega na symulacji procesu trafień piorunów z wykorzystaniem generatorów liczb losowych, o charakterystykach odpowiadających rozkładowi parametrów naturalnych wyładowań piorunowych. Zliczane są wyładowania będące w zasięgu promienia schwywania R_s , czyli uderzające w obiekt. Stosunek liczby uderzeń w obiekt do całkowitej liczby generowanych wyładowań daje procent wyładowań trafiających w obiekt i pozwala oszacować ryzyko uderzenia pioruna w obiekt.

Przepięcia wywołane bezpośrednim wyładowaniem piorunowym

W normie PN-IEC 62305 [9] podane są przebiegi czasowe i parametry prądu wyładowania atmosferycznego, zalecane do badań symulacyjnych. Postać czasowa prądu piorunowego pierwszej składowej wyładowania doziemnego o kształcie 10/350 μs podana jest zależnością:

$$i(t) = \frac{I_m}{0,93} \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \exp(-t/\tau_2) \quad (7)$$

Przy uderzeniu wyładowania atmosferycznego w trakcję, w wyniku przepływu prądu piorunowego, powstaje w niej przepięcie, które może zagrazić urządzeniom połączonym z przewodem

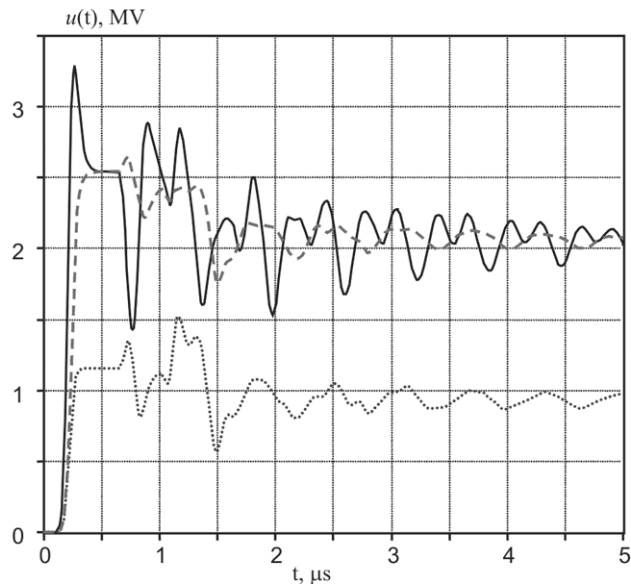
jezdnym. Do analiz komputerowych tego typu zjawisk bardzo dobrze nadaje się program symulacyjny EMTP-ATP [5, 6, 9].

Do obliczenia przepięć w sieci trakcyjnej w wyniku uderzenia pioruna przyjęto układ jak na rysunku 3. Schemat ten przedstawia trzy sąsiednie stopy trakcyjne oraz biegnące w obie strony 10-kilometrowe odcinki tracji. Odcinki tracji zamodelowano wieloprzewodową linią długą [9] składającą się z trzech przewodów: przewodu jezdnego i dwóch szyn. Do zamodelowania stupa przyjęto element LINE-Z będący modelem linii długiej bezstratnej, dla którego zadano impedancję udarową stupa Z_T i czas propagacji τ . Uszynyienie reprezentowane jest przez indukcyjność przewodu o indukcyjności jednostkowej wynoszącej $1 \mu\text{H/m}$. Wytrzymałość elektryczną izolatorów trakcyjnych zamodelowano wyłącznikami sterowanymi napięciem dla których przyjęto napięcie przebicia przerwy izolacyjnej $U_{ref} = 90 \text{ kV}$. Udar piorunowy uderzający w środkowy stóp zamodelowany został źródłem prądowym, dla którego zadano parametry kształtu zgodnie ze wzorem (7).

Z rozpatrywanych w [10, 11] zależności na wielkość impedancji udarowej stópów wybrano maksymalną, wyliczoną wielkość $Z_T = 280 \Omega$. Dla przyjętej prędkości propagacji fali prądowej w stupie równej prędkości światła ($v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$) otrzymano przebiegi napięć dla pierwszej składowej prądu o wielkości szczytowej $I_m = 25 \text{ kA}$ (rys. 4). Linia ciągłą oznaczono napięcie na przewodzie jezdnym, linią przerywaną na szynie uszynyionej biegnącej przy stópach, natomiast linią kropkową – na szynie zewnętrznej. Obliczone wielkości maksymalne napięć osiągają bardzo duże wielkości, wynoszące ponad 3 MV .

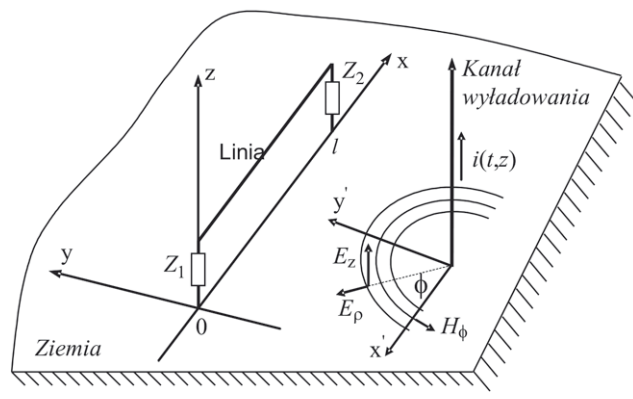
Przepięcia indukowane w liniach

Obliczanie dokładnych wielkości napięć indukowanych wyładowaniem atmosferycznym jest zagadnieniem złożonym i rozwijanym w ośrodkach naukowych różnych krajów. Podana zależność (4) jest bardzo prosta w użyciu i służy do szacowania wielkości napięć indukowanych. Jednym z narzędzi służących do obliczania napięć indukowanych w linii pobliskim wyładowaniem atmosferycznym jest program LCC (Lightning Coupling Code) [12, 13]. Konfiguracja obliczeniowa analizowanego układu zaimplementowanego w LCC (rys. 5). Układ składa się z linii długości L umieszczonej nad powierzchnią ziemi na wysokości h i obciążonej na



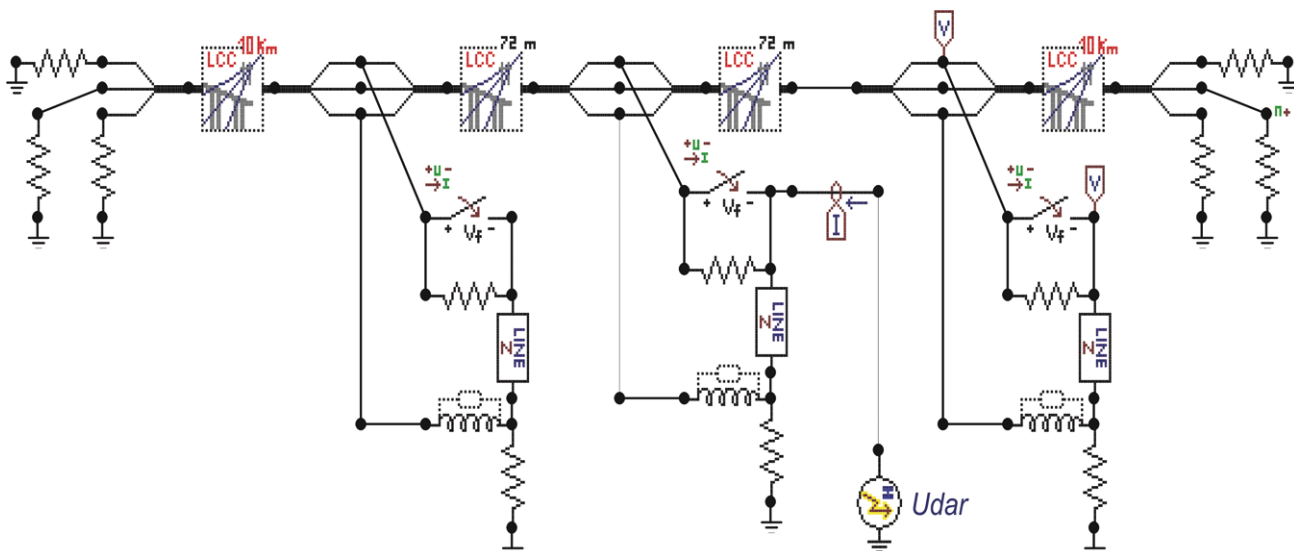
Rys. 4. Przebiegi napięć dla prądu piorunowego o wielkości szczytowej 25 kA

końcach impedancjami Z_1 i Z_2 . Kanał pioruna umieszczony jest w odległości Y od osi przewodu.

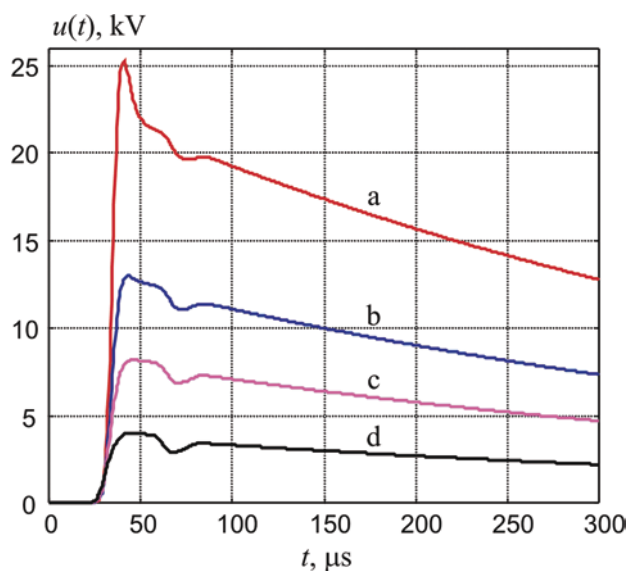


Rys. 5. Konfiguracja obliczeniowa programu LCC

Przykładowe wyniki obliczeń, pokazujące napięcia indukowane na końcach linii, przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 3. Schemat odcinka sieci trakcyjnej w warunkach uderzenia pioruna w stóp trakcyjny



Rys. 6. Przebiegi napięć przy różnych odległościach kanału piorunowego od linii
a - 500 m, b - 1000 m, c - 1500 m, d - 2500 m

Przebiegi zostały obliczone dla prądu pioruna o kształcie $10/350 \mu\text{s}$ i i wielkości szczytowej $I_m = 100 \text{ kA}$ dla następujących danych: długość linii $L = 10 \text{ km}$, wysokość zawieszenia przewodu $h = 5,5 \text{ m}$, promień przewodu $r = 0,6 \text{ cm}$. Jako obciążenie linii na obu końcach linii zadano impedancje równe impedancji falowej przewodu. Kanał pioruna został usytuowany na prostopadłej osi symetrii linii (rys. 5) w odległościach Y , równych a - 500 m, b - 1000 m, c - 1500 m i d - 2500 m. Dla odległości 500 m napięcia indukowane osiągają wielkości ponad 25 kV, przekraczając tym samym dopuszczalne wielkości podawane w [8].

Wnioski

Sieci trakcyjne, podobnie jak sieci elektroenergetyczne niskich i średnich napięć, nie są chronione przewodami odgromowymi od bezpośredniego uderzenia pioruna. Dlatego wielkości napięć wywołanych bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi, osiągające wielkości rzędu megawoltów, stanowią ogromne zagrożenie dla urządzeń trakcyjnych. Dużym zagrożeniem mogą być także napięcia indukowane uderzeniami pioruna w pobliżu trakcji. Mimo, że wielkości tych napięć są znacznie mniejsze, to obszar ich oddziaływania, a tym samym liczba wyładowań piorunowych w ciągu roku, jest znacznie większa. Otrzymane przykła-

dowe wyniki uzupełnione danymi o awaryjności burzowej linii trakcyjnych mogą stanowić narzędzie wspomagające projektowanie ochrony odgromowej i przeciwprzebiegowej sieci trakcyjnych. □

Literatura

- [1] Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*. WNT, Warszawa 1992.
- [2] Liew Ah Choy, Darveniza M., Currie J.R.: *Monte Carlo Determination of the Frequency of Lightning Strokes and Shielding Failures on Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, No. 5, 2305–2312, 1971.
- [3] IEEE Std 998-1996. IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations
- [4] PN-86/E-05003/01 *Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Wymagania ogólne*.
- [5] Wróbel Z., Ziemia R.: *Zastosowanie wybranych programów komputerowych w analizie zagrożeń napięciowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym – część 1*. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, SEMTRAK, Zakopane 2006.
- [6] Wróbel Z., Ziemia R.: *Zastosowanie wybranych programów komputerowych w analizie zagrożeń napięciowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym – część 2*. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, SEMTRAK, Zakopane 2006.
- [7] IEEE Std 1410-2004. *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*.
- [8] PN-EN 50163: 2005. *Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilające systemów trakcyjnych*.
- [9] Dommel H. W.: *ElectroMagnetic Transients Program, Reference Manual (EMTP Theory Book)*. Bonneville Power Administration, Portland Oregon 1986.
- [10] Sargent M. A., Darveniza M.: *Tower surge impedance*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-88, No. 5, 680–687, 1969.
- [11] Gutiérrez R., J.A., Moreno, P., Naredo, J.L., Bermúdez, J.L., Paolone, M., Nucci, C.A., Rachidi, F.: *Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, 490–496, 2004.
- [12] Tesche F.M., Ianoz M.V., Karlsson T.: *EMC analysis methods and computational models*. John Wiley & Sons, Inc., New York 1997.
- [13] Tesche F.M.: *EMC Analysis Codes (EMCodes)*. EMC – Electromagnetic Consulting Service, <http://www.tesche.com>

➤ *Dokończenie ze s. 30*

Zjawiska jakie występują w systemie zasilania trakcji tramwajowej wymagają wykorzystania matematycznych podstaw teorii gier do optymalizacji użytkownika systemu trakcyjnego z taborem zdolnym i pracującym z rekuperacją podczas hamowania.

Zwiększenie efektywności odzysku energii kinetycznej pojazdów w systemie transportowym to tak jakby zwiększenie wytarzania zielonej energii przez odbiorcę energii elektrycznej. □

Literatura

- [1] Mały słownik języka polskiego (pod red. S. Skorupki, H. Auderskiej, Z. Łempickiej). PWN, Warszawa 1969
- [2] Materiały katalogowe firm GE, Secheron.
- [3] PN-EN 50163:2006 *Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilania systemów trakcyjnych*.
- [4] Dąbrowski J.: *Rozkład napięcia ST szyny – tunel w Metrze Warszawskim*. MET' 2007 Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie 27–29.09.2007.
- [5] Materiały z Komisji Zasilania i Taboru Tramwajowego zorganizowanej przez IGKM w Poznaniu 16/17 listopada 2005.