

Dr inż. Zofia Wróbel
PKP - Polskie Linie Kolejowe S.A., Rzeszów

MODELOWANIE KABLI W ANALIZIE ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO SIECI TRAKCYJNYCH I URZĄDZEŃ STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Modelowanie układu
3. Model czteroprzewodowej wzajemnie sprzężonej linii długiej
4. Udar prądowy 8/20 μ s
5. Wybrane wyniki modelowania
6. Podsumowanie i wnioski

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki modelowania impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. W tym celu opracowano modele poszczególnych elementów układu: sieć trakcyjna, sieć szynowa, kabel, słup, izolator, odgromnik, udar. W analizie prowadzonej w programie LTSPICE uwzględniono model czteroprzewodowej wzajemnie sprzężonej linii długiej.

1. WPROWADZENIE

Specyficzne warunki pracy sieci kablowej urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk) powodują, że jest ona narażona na wpływ różnych czynników zewnętrznych. Mogą one być przyczyną zakłóceń w pracy tych urządzeń [4, 5, 6]. Ma to szczególne znaczenie dla linii zasilanych trakcją elektryczną ze względu na niebezpieczeństwo porażenia elektrycznego przy obsłudze, jak również w przypadku uszkodzenia izolacji, galwanicznego oddziaływania linii i urządzeń trakcji elektrycznej [7, 12].

Poważnym problemem są zagrożenia pojawiające się podczas występowania bezpośredniego udaru piorunowego w sieciach trakcyjnych. W wyniku udaru, elementy układów zasilania sieci trakcyjnych i połączone z nimi urządzenia sterowania ruchem kolejowym, są narażone na przepięcia o dużych amplitudach.

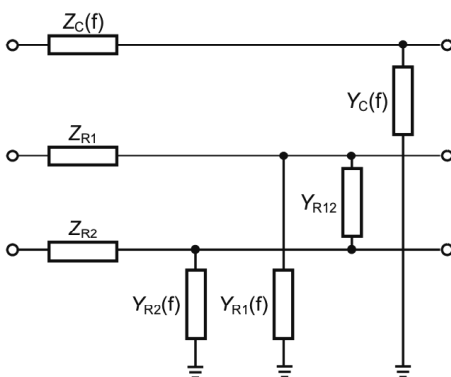
2. MODELOWANIE UKŁADU

Złożoność problematyki kompatybilności elektromagnetycznej w środowisku kolejowym jest uwarunkowana:

- znaczną rozległością obszarową,
- wzajemnym oddziaływaniem obwodów i urządzeń wysoko i niskonapięciowych przy różnych systemach zasilania,
- wspólnym prowadzeniem kabli zasilających, sygnałowych, sterujących i telekomunikacyjnych,
- złożonością i wzajemnym powiązaniem podsystemów, w tym urządzeń różnych generacji,
- możliwością jednoczesnego oddziaływania zaburzeń z wielu źródeł.

2.1. Sieć trakcyjna

Modelowanie zagrożeń powodowanych impulsowymi zaburzeniami elektromagnetycznymi wymaga opracowania modelu uwzględniającego parametry R , L , C i ich zmienność w funkcji częstotliwości. W analizie uwzględniono, że jest to obwód o parametrach rozłożonych. Ogólny schemat przyjętego do obliczeń modelu sieci zasilającej i powrotnej przedstawiono na rysunku 1 [12]. Jako założenia upraszczające do analizy przyjęto, że prędkość rozchodzenia się fal jest równa prędkości światła oraz nie uwzględniono odbić fal prądowych od szczytu kanału wyładowania.

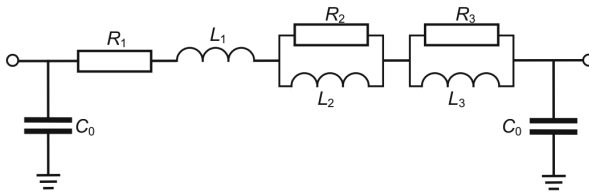


Rys. 1. Model impedancyjno-admitancyjny odcinka toru [12]

Dla pasma częstotliwości rzędu kilku kHz, uwzględnianego w tego rodzaju analizach, sieć trakcyjna ma długość ćwierćfali, odpowiadającą długości odcinka między podstacjami. Zgodnie z danymi z literatury przedstawionymi w pracy [12] wynika, że jeżeli długość odcinka sieci trakcyjnej zastąpionego czwórnikiem nie przekracza 3% długości fali, to błąd takiego modelu jest mniejszy niż 2,5%. Dla przyjętej do analizy częstotliwości 10 kHz długość czwórnika spełniającego ten warunek wynosi 900 m. W utworzonym modelu

obliczeniowym długość czwornika odpowiada odległości między dwoma słupami sieci trakcyjnej, tj. 72 m.

Wyznaczone dla odcinka sieci trakcyjnej o długości 72 m parametry z pomiarów (rys. 2) [12], przy uwzględnieniu częstotliwościowo zależnej charakterystyki parametrów przewodów wyniosły: $R_{s1} = 4,32 \text{ m}\Omega$, $L_{s1} = 72 \text{ }\mu\text{H}$, $R_{s2} = 129,6 \text{ m}\Omega$, $L_{s2} = 33,84 \text{ }\mu\text{H}$, $C_1 = C_2 = 1,31 \text{ nF}$.

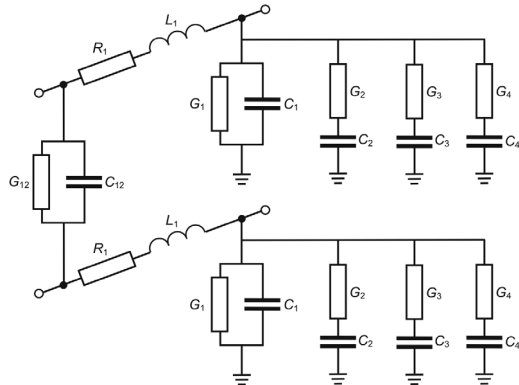


Rys. 2. Czwornik jako element modelu sieci trakcyjnej uwzględniający zmienność w funkcji częstotliwości [12]

2.2. Sieć szynowa i parametry elektryczne toru

Parametry szyn wyznaczone na podstawie wyników pomiarów zamieszczonych w [12] dla długości czwornika 72 m wyniosły (rys. 3): $R_1 = 0,576 \text{ }\Omega$, $L_1 = 0,0576 \text{ mH}$, $G_{12} = 0,115 \text{ S}$, $C_{12} = 1,44 \text{ }\mu\text{F}$. W podobny sposób obliczono parametry zastępcze czwornika opisującego odcinek sieci szynowej przy uwzględnieniu ich zmienności w funkcji częstotliwości (szyna 1): $G_1 = 6,24 \text{ mS}$, $C_1 = 3,98 \text{ }\mu\text{F}$, $G_2 = 6,07 \text{ mS}$, $C_2 = 0,37 \text{ mF}$, $G_3 = 13,3 \text{ mS}$, $C_3 = 5,94 \text{ }\mu\text{F}$, $G_4 = 0,305 \text{ S}$, $C_4 = 3,06 \text{ }\mu\text{F}$.

Takie same wartości przyjęto dla drugiego czwornika połączonego z szyną 2. Uwzględniono również połączenia wyrównawcze pomiędzy szynami co około 300 m.

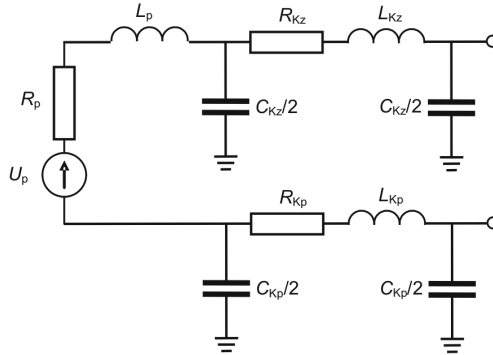


Rys. 3. Schemat odcinka toru kolejowego z uwzględnieniem wpływu ziemi [12]

2.3. Model podstacji

Jako model podstacji (rys. 4) przyjęto parametry uwzględniające: napięcie podstacji $U_p = 3450 \text{ V}$, indukcyjność podstacji i systemu zasilania $L_p = 4.774 \text{ mH}$ [2]. Parametry

kabla powrotnego i zasilającego wprowadzono zgodnie z wynikami pomiarów zamieszczonymi w pracy [2] dla częstotliwości 10 kHz i długości kabla 200 m jako: $R_{Kz} = R_{Kp} = 3 \Omega$, $L_{Kz} = L_{Kp} = 0,13 \text{ mH}$, $C_{Kz} = C_{Kp} = 0,4 \mu\text{F}$. Model ten, przyjęty do obliczeń jako czwórnik, może być rozbudowywany w dalszych symulacjach.



Rys. 4. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej i połączeń kablowych [6]

2.4. Słupy

Do analizy przepięć pochodzenia atmosferycznego, model słupa może być przyjęty jako szeregowe połączenie indukcyjności i rezystancji. Zakładając indukcyjność jednostkową $L_0 = 1,67 \mu\text{H/km}$ wyznaczoną z zależności:

$$L = 0,2 \mu_r \frac{2h}{r} [\mu\text{H/km}], \quad (1)$$

gdzie: μ_r – przenikalność magnetyczna względna (dla powietrza $\mu_r = 1$),

h – wysokość słupa,

r – promień przewodu,

przyjęto indukcyjność słupa $L = 20,28 \mu\text{H}$, a rezystancję słupa jako $R = 10\Omega$. Jako uszytnienie słupa przyjęto indukcyjność $L = 5 \mu\text{H}$ [14].

2.5. Odgromniki i iskierniki

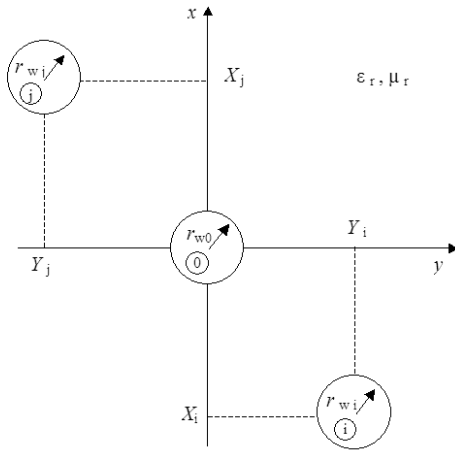
W modelu słupa jako model izolatora uwzględniono w analizie wyłącznik sterowany napięciem 90 kV. Model odgromnika różkowego wprowadzono natomiast jako wyłącznik sterowany napięciem o wartości napięcia przeskoku 12 kV i powietrznej przerwie o rezystancji 100 M Ω [13, 14].

Odgromniki różkowe, stosowane do ochrony sieci trakcyjnej, są instalowane co 1200 m lub 600 m (dla terenów o dużej intensywności burzowej, większej niż 30 dni w roku). W analizie uwzględniono odległości 600 m [8].

3. MODEL CZTEROPRZEWODOWEJ WZAJEMNIE SPRĘŻONEJ LINII DŁUGIEJ

Wyznaczenie parametrów L i C linii długiej 37-żyłowego kabla YKSY(żo) z użyciem parametrów jednostkowych i przy zastosowaniu równań analizy obwodów elektrycznych omówiono w [15]. W artykule uwzględniono oddziaływanie pomiędzy siecią trakcyjną, szynami i kablem do urządzeń srk (rys. 5) stosując model czteroprzewodowej wzajemnie sprężonej linii długiej z wykorzystaniem źródeł sterowanych (załącznik 1) w programie LTSPICE [3]. Piątym przewodem jest przewód odniesienia. W tego rodzaju analizie kabel wielożyłowy jest modelowany jako pojedynczy przewód [1].

Do analizy przyjęto parametry geometryczne, jak w przypadku 37-żyłowego kabla sygnalizacyjnego YKSY(żo) (rys. 6). Długość odcinków odpowiada odległości pomiędzy słupami trakcyjnymi i wynosi 72 m. W przyjętym układzie kabel jest umieszczony na powierzchni ziemi w odległości 1,5 m od osi toru.



Rys. 5. Przykładowy model wzajemnie sprężonej linii długiej (w programie LTSPICE) dla dwóch przewodów umieszczonych w ośrodku jednorodnym [11]

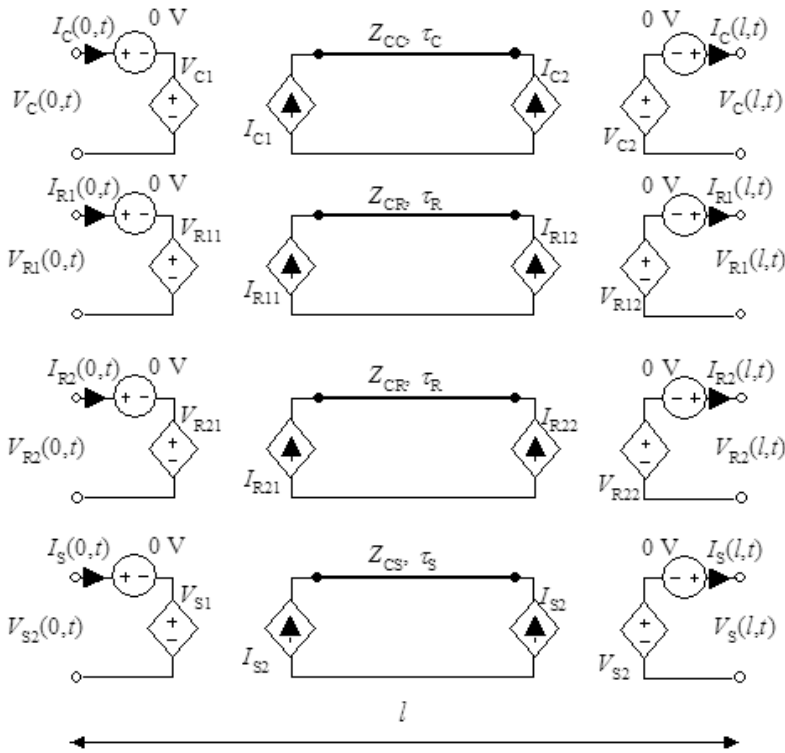
Załącznik 1

```
*SUBCIRCUIT MODEL OF A MULTICONDUCTOR TRANSMISSION LINE*
* NUMBER OF CONDUCTORS= 5
* TOTAL LINE LENGTH (METERS)= 7.20000E+01

* L( 1, 1)=4.37826E-07   L( 1, 2)= 3.09396E-09   L( 1, 3)= 2.71790E-09   L( 1, 4)= 7.41491E-10
*                       L( 2, 2)= 1.97932E-06   L( 2, 3)= 2.25282E-08   L( 2, 4)= 2.25080E-08
*                       L( 3, 3)= 5,12600E-07   L( 3, 4)= 1.84930E-08
*                       L( 4, 4)= 5.12600E-07

* C( 1, 1)=2.54142E-11   C( 1, 2)=-3.78787E-14   C( 1, 3)=-1.31992E-13   C( 1, 4)=-3.03373E-14
*                       C( 2, 2)= 5.62687E-12   C( 2, 3)=-2.38492E-13   C( 2, 4)=-2.38414E-13
*                       C( 3, 3)= 2.17451E-11   C( 3, 4)=-7.73832E-13
*                       C( 4, 4)= 2.17444E-11

T101 501od 0 601od 0 Z0= 1.312372E+02 TD= 2.401661E-07
T102 502od 0 602od 0 Z0= 5.901660E+02 TD= 2.401664E-07
T103 503od 0 603od 0 Z0= 1.532995E+02 TD= 2.401659E-07
T104 504od 0 604od 0 Z0= 1.536971E+02 TD= 2.401661E-07
.ENDS oddz
```



Rys. 6. Model wzajemnie sprzężonej czteroprzewodowej linii długiej z wykorzystaniem źródeł sterowanych [11]

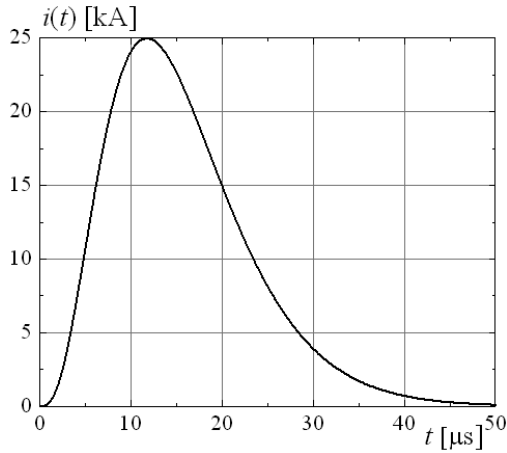
Symulację prowadzono dla układu składającego się ze 178 sekcji, dających model linii o długości 12,816 km. Model linii bezstratnej uzupełniono o straty podłużne, reprezentowane przez rezystancje podłużne umieszczone w węzłach między sekcjami linii.

4. UDAR PRĄDOWY 8/20 MS

Do symulacji przyjęto wymuszenie w postaci udaru prądowego 8/20 μs , jak na rysunku 7. Dla celów symulacji komputerowych oraz do projektowania generatorów udarów są podawane zależności matematyczne definiujące parametry i kształty impulsów [9, 11]. Impuls prądowy 8/20 μs może być przybliżony zależnością:

$$i(t) = A I_p t^3 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

z parametrami wynoszącymi: $A = 0,01243 (\mu\text{s})^{-3}$; $\tau = 3,911 \mu\text{s}$.



Rys. 7. Przebieg udaru prądowego 8/20 μs , $I_p = 25$ kA [14]

Poziomy odporności na udary urządzeń srk są określone w normie PN-EN50121-4, 2002(U) [10].

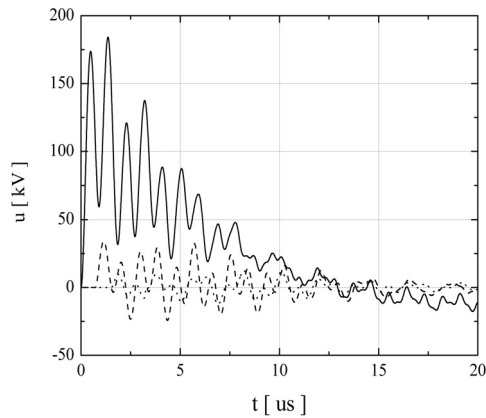
5. WYBRANE WYNIKI MODELOWANIA

Na rysunkach 8–11, przedstawionych w dalszej części artykułu, zamieszczono przykładowe przebiegi z modelowania w programie LTSPICE propagacji sygnałów napięciowych dla wymuszenia w postaci fali prądowej 8/20 μs ($I_{\text{max}} = 25$ kA). Przedstawione wcześniej elementy analizowanego układu zgrupowano w postaci czwórników typu Π , tworząc trzy modele czwórników zawierające odcinek sieci trakcyjnej i toru o długości 72 m oraz:

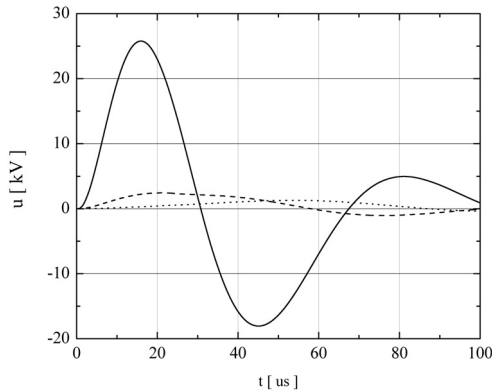
- 1) słup z izolatorem,
- 2) słup z odgromnikiem różkowym,
- 3) słup, do którego doprowadzono udar.

Do analizy przyjęto odcinek zawierający 178 czwórników. W połowie odległości pomiędzy podstacjami wprowadzono czwórnik z zamodelowanym udarem. W celu uproszczenia założono metaliczne zwarcie na wyłączniku słupa.

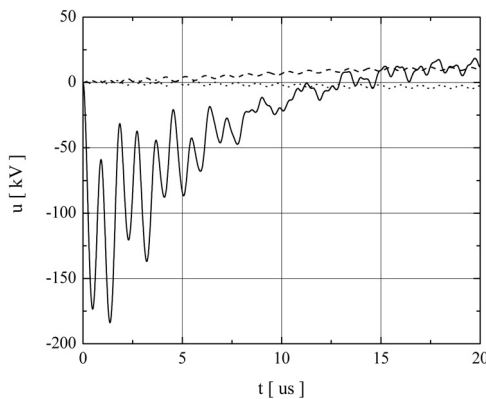
Na rysunku 8 przedstawiono wybrane przebiegi napięć dla słupa z doprowadzonym udarem (linia ciągła) i dwóch kolejnych słupów (linia przerywana i kropkowa) w miejscu ich połączenia z wyłącznikiem. Na rysunku 9 zamieszczono przebiegi napięć dla tych samych słupów w miejscu połączenia z szyną. Rysunki 10 i 11 zawierają przykładowo wybrane wyniki modelowania sprzężeń pomiędzy siecią trakcyjną i szynami oraz kablem dla odcinka, do którego doprowadzono udar.



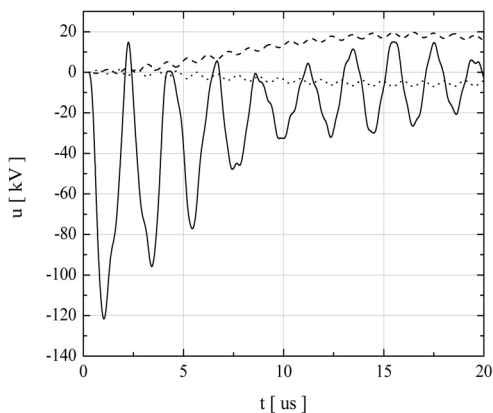
Rys. 8. Przebiegi napięć dla modelu wzajemnie sprzężonej linii długiej na słupie, do którego doprowadzono uder o kształcie 8/20 μ s i wartości maksymalnej 25 kA (linia ciągła) oraz kolejnych słupach w odległości 72 (linia kreskowana) i 144m (linia kropkowana)



Rys. 9. Przebiegi napięć dla słupów z rys.8 w miejscu połączenia z szyną



Rys. 10. Przebiegi napięć dla modelu wzajemnie sprzężonej linii długiej (na początku 72-metrowego odcinka, do którego doprowadzono uder 8/20 μ s) pomiędzy: siecią trakcyjną i szyną nr 1 (linia ciągła), siecią trakcyjną i szyną nr 2 (linia kreskowana), siecią trakcyjną i kablem (linia kropkowana)



Rys. 11. Przebiegi napięć dla modelu wzajemnie sprzężonej linii długiej (na końcu 72-metrowego odcinka, do którego doprowadzono uder) pomiędzy: siecią trakcyjną i szyną nr 1 (linia ciągła), siecią trakcyjną i szyną nr 2 (linia kreskowana), siecią trakcyjną i kablem

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule omówiono elementy składowe modelu matematycznego, opisującego przyjęty do analizy układ sieci trakcyjnej z kablem położonym równolegle do szyn w odległości 1,5 m od osi toru. Wprowadzono model wzajemnie sprzężonej linii długiej. Zbudowany model sieci złożony z elementów opisanych w rozdziale 2, reprezentuje odcinek sieci trakcyjnej o długości około 12,8 km. Elementy składowe wprowadzone w postaci czwórników, można rozbudowywać lub uzupełniać o kolejne, w zależności od rodzaju stosowanych elementów rzeczywistego układu.

Ocena zagrożeń sieci trakcyjnych powodowanych wyładowaniami atmosferycznymi wymaga prowadzenia dokładnych analiz rozptyłu prądu piorunowego i spadków napięć w elementach konstrukcyjnych i instalacyjnych analizowanych urządzeń. Zastosowanie programu LTSPICE znacznie ułatwia żmudną i skomplikowaną analizę oraz ocenę zachodzących zjawisk. Rozeznane możliwości programu mają charakter poznawczy i zostaną wykorzystane do dalszej analizy i oceny zagrożeń elementów zasilania urządzeń kolejowych, powodowanych przepięciami pochodzenia atmosferycznego.

BIBLIOGRAFIA

1. Ahmad A.S., Aka-Ngnui T.: *Lightning induced voltage on telephone cables and power systems*. International Conference on Power Systems Transients (IPST'07) in Lyon, France on June 4–7, 2007.
2. Białoń A., Kaźmierczak A., Zajac W.: *Opracowanie dopuszczalnych parametrów zakłóceń dla urządzeń srk, łączności i pojazdów trakcyjnych*. Sprawozdanie końcowe. Praca 6915/23. Warszawa, CNTK, 1999.

3. Clayton Paul R.: *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons, Inc. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada, 2006.
4. Kulawiak A, Kabacińska B., Kaźmierczak A.: *Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 2. Analiza uszkodzeń urządzeń srk spowodowanych przepięciami*. Wersja 2. Nr 4036/20. Warszawa, CNTK, 2003.
5. Kulawiak A., Kabacińska B., Kaźmierczak A.: *Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 1. Przygotowanie zbioru dokumentacji najczęściej uszkodzanych urządzeń srk*. Wersja 2, 4036/20. CNTK, Warszawa, 2003.
6. Laskowski M., Kulawiak A.: *Ochrona przeciwprzepięciowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi*. Praca CNTK, 1002/24. Warszawa, 1994.
7. Laskowski M., Malesa R., Wróbel Z. i inni: *Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych*. Praca CNTK (Zakład Telekomunikacji) nr 1049/24. Warszawa, 1997.
8. Laskowski M., Wróbel Z.: *Wpływ impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na obwody torowe*. VIII Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, SEMTRAK'98. Zakopane, 1998.
9. PN-EN 61000-4-5, (1998) – *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badania odporności na udary*.
10. PN-EN50121-4, 2002(U) – *Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 4. Emisja i odporność na zakłócenia urządzeń sygnalizacji i telekomunikacji*.
11. Sowa A.: *Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa*. Warszawa, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, 2005.
12. Szelaǳ A.: *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*. „Prace Naukowe, Elektryka” z. 123. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002.
13. Wróbel Z., Ziemia R.: *Computer modelling of the railway electric traction cused by fast surge*. MODERN ELECTRIC TRACTION. POWER SUPPLY. Edited by Krzysztof Karwowski, Adam Szelaǳ, Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering. Gdańsk, 2009.
14. Wróbel Z.: *Computer modelling of lightning discharge threat to railway installations*, MODERN ELECTRIC TRACTION. POWER SUPPLY. Edited by Krzysztof Karwowski, Adam Szelaǳ, Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering. Gdańsk, 2009.
15. Wróbel Z.: *Zastosowanie modelu kabla wielożyłowego w analizie zagrożeń urządzeń sterowania ruchem kolejowym*. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej. XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Zakopane, październik, 2010, 373–382.