

Zofia Wróbel, Robert Ziemia

Modelowanie przebiegów atmosferycznych jako źródeł zakłóceń w układach zasilania odbiorów nietrakcyjnych

Podczas występowania bezpośredniego uderzenia piorunowego w układach zasilających odbiory potrzeb nietrakcyjnych zagrożenie uszkodzenia urządzeń może występować niemal przy każdym wyładowaniu, nawet dość odległym. Skutkiem tego na przebiegi o dużych amplitudach narażone są elementy układów zasilania linii potrzeb nietrakcyjnych i połączone z nimi urządzenia sterowania ruchem kolejowym (srk). Możliwe jest występowanie w układach zasilających zakłóceń o wielkościach porównywalnych z sygnałami użytecznymi wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi lub będących wynikiem zadziałania zdalnych impulsów elektromagnetycznych.

Zapobieganie tego rodzaju zakłóceniom jest problemem bardzo złożonym i wymaga wzajemnego połączenia wielu zagadnień. Jedną z metod analizy są badania w rzeczywistym układzie energetycznym wykonywane drogą specjalnie organizowanych pomiarów lub za pomocą rejestratorów przebiegów zainstalowanych w układach energetycznych, które rejestrują stany nieustalone w czasie pracy układu. Badania te są również często symulowane metodami analizy matematycznej [1]. Referat zawiera wyniki modelowania impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. Opracowane zostały modele poszczególnych elementów układu: uderzenie, linia potrzeb nietrakcyjnych, wybrane układy zasilania urządzeń sterowania ruchem kolejowym, transformator, słup, izolator, odgromnik.

Modelowanie elementów układu

Linie zasilające urządzenia srk są zaliczane do odbiorów nietrakcyjnych i nazywane liniami potrzeb nietrakcyjnych (l_{pn}). Linie te są podzielone na odcinki o długości nie przekraczającej 30 km, prowadzone wzdłuż szlaków kolejowych i zasilane dwustronnie z podstacji trakcyjnych napięciem przemiennym 15 kV. Dąży się do ujednolicenia napięcia, stosuje się również napięcie 6 kV. Od tych linii wykonywane są połączenia do stacji transformatorowych zasilających między innymi stacje kolejowe, posterunki odstępowe i odgałęźne, kabiny sekcyjne, urządzenia samoczynnej blokady liniowej, oświetlenie itp. Ochronie od przebiegów podlegają transformatory i odcinki kablowe, a do ochrony wymienionych elementów stosowane są odgromniki zaworowe.

Obecnie jest wiele programów komercyjnych, które mogą być stosowane do kompleksowej analizy układów elektroenergetycznych zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości. Standardowy program obliczeniowy PSPICE [2] umożliwia symulacje rzeczywistych elementów układu i dobór odpowiednich zabezpieczeń. Wnikliwe analizy porównawcze wyników symulacji dają możliwość oceny różnic między rzeczywistymi elementami

i ich modelami matematycznymi, a tym samym pomagają prawidłowo dobrać parametry elementów ochronnych [3].

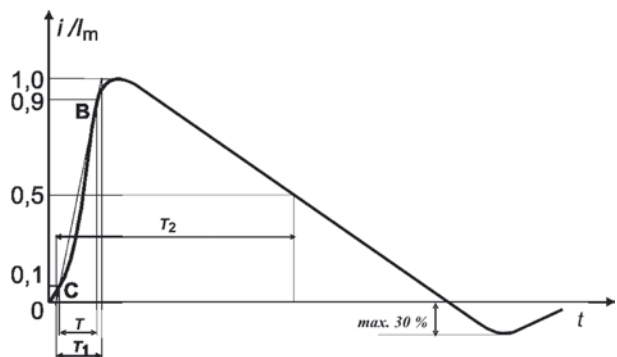
Wyładowanie atmosferyczne

Wyładowania atmosferyczne należą do grupy szczególnie niebezpiecznych, niszczących impulsów o szerokim zasięgu, charakteryzujących się dużymi wielkościami szczytowymi i krótkimi czasami narastania. Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń sterowania ruchem kolejowym wymaga uwzględnienia doświadczeń wynikających z badań i obserwacji [4, 5]. Wskazują one na celowość stosowania układów ochronnych. Dowodzą, że urządzenia nie wyposażone w układy ochrony przeciwprzebiegiowej, znajdujące się w obszarze o promieniu 1–1,5 km od miejsca uderzenia pioruna mogą ulec zniszczeniu.

W tym zakresie prace projektowo-badawcze, z zastosowaniem symulacji komputerowych zyskują coraz większe uznanie. Dają bowiem możliwość uwzględnienia wpływu różnych czynników przy jednoczesnym zminimalizowaniu kosztów analizy. Pozwalają wykonywać symulacje rzeczywistych elementów układu i dobierać odpowiednie urządzenia ochronne.

Udar prądowy 8/20 μs

W normie EN 61000-4-5 [6] zdefiniowany jest kształt uderzenia prądowego (rys. 1), uwzględniający przebieg prądu zwarciego dla uderzenia prądowego (zgodnie z definicją CEI 60-1): czas trwania czoła uderzenia $T_1 = 1,25 \cdot T = 8 \mu s \pm 20\%$, czas przebiegu napięcia do połowy wielkości na grzbiecie: $T_2 = 20 \mu s \pm 20\%$; punkty C (0,1·i/I_m), B (0,9·i/I_m) jako charakterystyczne do wyznaczenia wielkości I.

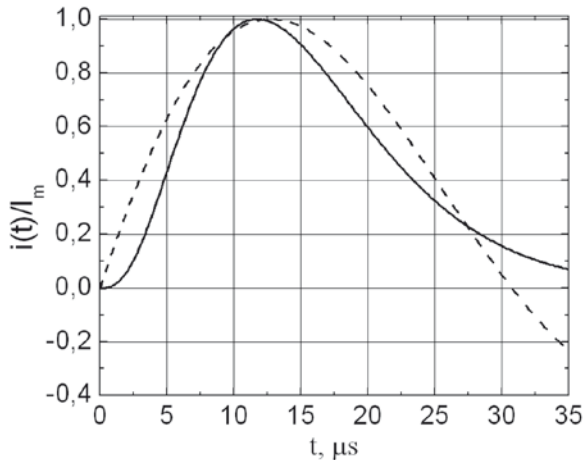


Rys. 1. Kształt i parametry przebiegu prądu piorunowego

Postać czasową uderzenia prądowego 8/20 μs można przybliżyć pierwszą potęgą sinusoidy tłumionej według zależności [7]:

$$i(t) = 1,482 I_m \exp(-28 \cdot 10^3 t) \sin(102,1 \cdot 10^3 t) \quad (1)$$

Rysunek 2 przedstawia przebieg udaru prądowego, opisany zależnością (1) do momentu pierwszego przejścia funkcji przez zero, wynoszącego około 30,7 μs . Fizycznie odpowiada to uwzględnieniu jednego dodatniego przeskoku na iskierniku generatora.



Rys. 2. Kształt przebiegu prądu 8/20 μs opisanego zależnościami (1) – linia przerywana i (2) – linia ciągła

Przebieg ten porównano z przebiegiem proponowanym przez Autorów [8, 9] i określonym zależnością:

$$i_2(t) = A \cdot I_m \cdot t^3 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

gdzie:

$$\tau = 3,911 \mu\text{s}, A = 0,01243 (\mu\text{s})^3.$$

Model linii potrzeb nietrakcyjnych

W programie PSPICE modele linii przesyłowych reprezentują przewody wykorzystywane jako zasilające linie energetyczne oraz linie telekomunikacyjne. Poprzez dołączenie wyliczonych parametrów linii do pliku danych zawierających pozostałe elementy badanego układu (źródła, elementy skupione RLC, ochronniki itd.) można – obserwując przebiegi czasowe napięć i prądów – ocenić zagrożenie, jakie może wystąpić w wyniku przepięć i przeładowań.

Analiza zjawisk wywołanych przepięciami pochodzenia atmosferycznego polega między innymi na stworzeniu modelu przeznaczonego do badania rozchodzenia się fal wędrownych powodowanych uderzeniem pioruna w obiekty energetyczne. W badaniach tego typu przepięć charakter zjawisk umożliwia zastąpienie trójfazowych układów prądu przemiennego jednofazowymi, a rozważania stanów nieustalonych w układach jednofazowych przy założeniu takiego przybliżenia dają prawidłowe wyniki. Analiza propagacji fal może być prowadzona na podstawie równań Maxwella lub telegrafistów. Rozważany model linii długiej można opisać równaniami [10]:

$$-\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = R_0 i(z,t) + L_0 \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = G_0 u(z,t) + C_0 \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \quad (4)$$

gdzie:

R_0, L_0, C_0 i G_0 – parametry linii na jednostkę długości.

Dla większości zastosowań praktycznych analizę przeprowadza się przy pominięciu rezystancji R_0 i upływności G_0 . Takie uproszczenie jest uzasadnione, jeżeli stałe czasowe L_0/R_0 i C_0/G_0 są bardzo duże w porównaniu z parametrami czasowymi wymuszeń udarowych. Przy założeniu, że $R_0 = 0$ i $G_0 = 0$ wyznaczono prędkość propagacji fali w linii v :

$$v = \frac{1}{L_0 C_0} = \frac{1}{\epsilon \mu} \quad (5)$$

impedancję falową linii bezstratnej Z_c :

$$Z_c = \frac{L_0}{C_0} \quad (6)$$

Wartości Z_c i czasu propagacji w linii $\tau = l/v$ przyjęto dla przewodu AFL6 – 35 mm² [11] o indukcyjności L_0 wyliczonej ze wzoru:

$$L_0 = 4,6 \left(\log \frac{a}{0,78r} \right) 10^{-4} \text{ [H/km]} \quad (7)$$

gdzie:

a – odstęp między osiami przewodów, przy symetrycznym, trójkątnym układzie przewodów $a = 1,8$ m;

r – promień przewodu ($r = 0,004$ m).

Indukcyjność jednostkowa przewodu $L_0 = 1,27$ mH/km.

Pojemność wyliczona ze wzoru:

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{a}{r}} = \frac{0,0241}{\log \frac{a}{r}} \text{ [\mu F/km]} \quad (8)$$

wynosi $C_0 = 9,083$ nF/km.

Zgodnie ze wzorem (6) wartość $Z_c = 373 \Omega$. Dla analizowanego wycinka linii, przy założeniu odległości między słupami $l = 140$ m, czas propagacji $\tau = 0,476 \mu\text{s}$.

Słupy

W analizie przepięć pochodzenia atmosferycznego model słupa może być realizowany jako szeregowo połączenie indukcyjności i rezystancji uziemienia [11, 12]. Do analizy przyjęto słup P12 o indukcyjności jednostkowej $L_0 = 1,7 \mu\text{H/km}$, wyliczonej ze wzoru:

$$L_0 = 0,2 \mu_r \ln \frac{2h}{r} \text{ [\mu H/km]} \quad (9)$$

gdzie:

μ_r – przenikalność magnetyczna względna,

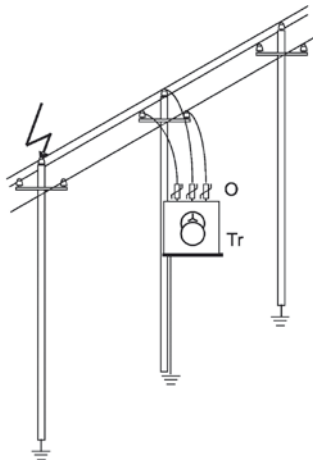
h – wysokość słupa,

r – promień zastępczy przewodu uziemiającego słupa.

Jako rezystancję uziemienia słupów z zainstalowanymi transformatorami przyjęto $R = 5 \Omega$, a pozostałych $R = 10 \Omega$.

Transformatory

W uproszczonej analizie przebiegów łączeniowych model transformatora może być zadany jako połączenie indukcyjności górnego i dolnego napięcia. W warunkach przebiegów udarowych, np. pochodzenia atmosferycznego, indukcyjności uzwojenia można pominąć, uwzględniając tylko doziemną pojemność wejściową [11].



Rys. 3. Szcik przyjętego do analizy wycinka linii potrzeb nietrakcyjnych

W obliczeniach przykładowego odcinka linii uwzględniono transformator $T - 3z0Ng$ o mocy znamionowej $S_n = 40$ kVA i napięciu $U_n = 6$ kV.

Wielkość pojemności C_1 uzwojenia górnego napięcia wyliczona ze wzoru:

$$C_1 = \varepsilon \frac{S_n}{U_n} \quad (10)$$

wynosi $C_1 = 0,0833$ nF dla przyjętej wielkości współczynnika $\varepsilon = 10$ nF/kA.

Odgromniki i iskierniki

Nieliniowa charakterystyka odgromnika zaworowego [13] po zaoplonie może być aproksymowana zależnością:

$$U_0 = a \cdot i_0^b \quad (11)$$

gdzie:

U_0 – napięcie na stosie zmiennooporowym podczas przepływu prądu przez odgromnik,

a – stała zależna od konstrukcji stosu zmiennooporowego,

i_0 – prąd przepływający przez odgromnik,

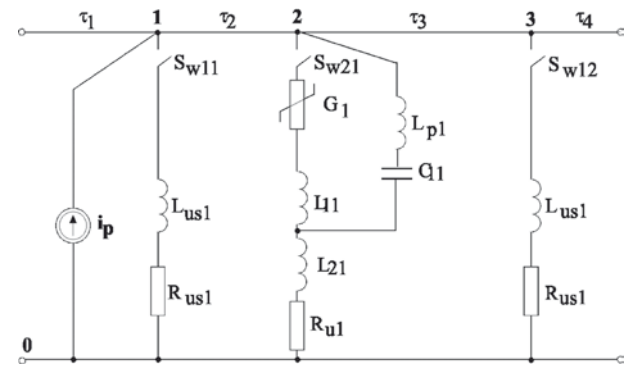
b – współczynnik zaworowości stosu zmiennooporowego.

Do analizy przyjęto odgromnik GZa 6/5 [13] o nieliniowym przebiegu charakterystyki stosu zmiennooporowego dla danych: $a = 15,06$; $b = 0,144$. Do symulacji przyjęto izolator LWP 8-20 [14], zamodelowany wyłącznikiem (rys. 4) oznaczenia: S_{w11} , S_{w12} , S_{w21} , dla którego parametrem charakterystycznym jest napięcie probiercze pod deszczem o wielkości 50 kV.

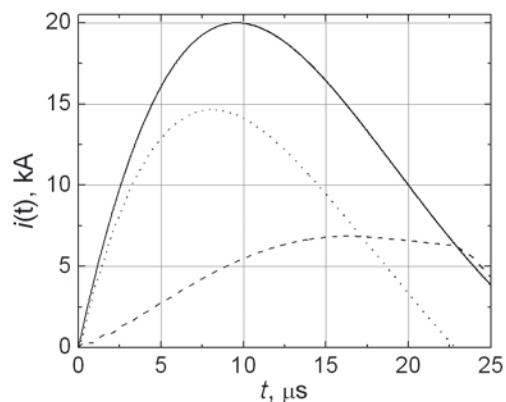
Na rysunku 4 przedstawiono układ zawierający przyjęte do analizy elementy: L_{us} (1, 2) oraz R_{us} (1, 2) – indukcyjność i rezystancja stópów bez transformatorów, $S_{w(11, 12, 21)}$ – izolator, G_1 – odgromnik, L_{p1} – indukcyjność przewodu łączącego górne uzwojenie transformatora z linią, L_{11} – indukcyjność górnej części

stupa nad transformatorem, L_{21} – indukcyjność dolnej części stupa pod transformatorem, R_{u1} – rezystancja stupa z zainstalowanym transformatorem.

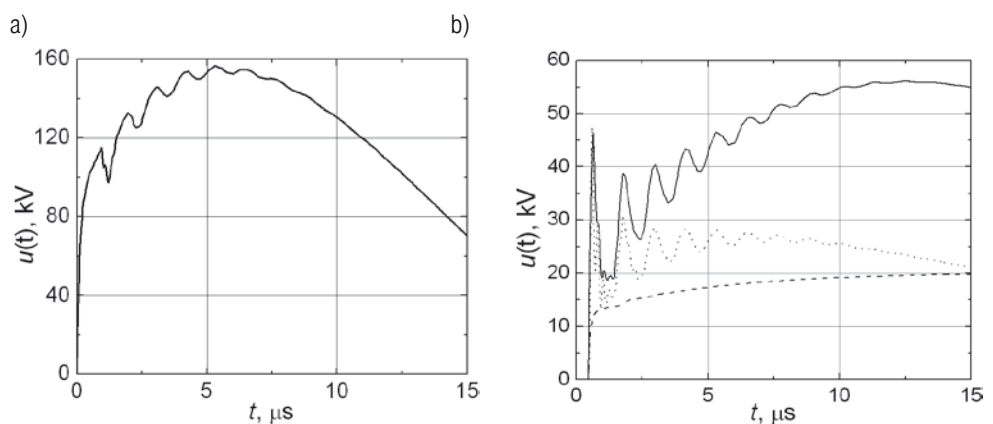
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki symulacji w analizowanym układzie przy wymuszeniu w postaci źródła prądowego danego zależnością (1) o wartości szczytowej prądu $I_m = 20$ kA.



Rys. 4. Schemat analizowanego układu



Rys. 5. Rozpływ prądów w układzie: udar wymuszający (linia ciągła), prąd do stupa uderzonego (linia kropkowa), prąd do stupa z transformatorem (linia kreskowa)



Rys. 6. Przebiegi napięć: a) na stupie do którego przyłożono wymuszenie udarowe; b) na stupie z transformatorem (napięcie na fazie – linia ciągła, napięcie na transformatorze – linia kropkowa, napięcie na ochronniku – linia przerywana)

Wnioski

Prezentowane przykładowe przebiegi napięć otrzymano w wyniku symulacji przy wymuszeniu udarem prądowym o kształcie $8/20 \mu s$ i wielkości szczytowej 20 kA. Wielkość przepięcia w miejscu przyłożenia wymuszenia osiąga prawie 160 kV. Poka-

zane na rysunku 6b przepięcia na stupie z transformatorem osią-
gają na fazie wielkości 60 kV. Napięcie na ochronniku ustala się
na poziomie ok. 21 kV zgodnie z zadanymi w modelu wielkościa-
mi napięcia obniżonego i jego charakterystyką nieliniową daną
zależnością (11). Widać też działanie ochronne obniżające napię-
cie na transformatorze.

Zastosowanie programu PSPICE znacznie ułatwia żmudną
i skomplikowaną analizę zjawisk związanych z przepięciami at-
mosferycznymi. Rozeznane możliwości programu zostaną wyko-
rzystane do dalszej analizy zagrożenia urządzeń srk powodowa-
nych przepięciami pochodzenia atmosferycznego.



Literatura

- [1] Au A., Maksymiuk J. Pochanke Z.: *Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa 1984.
- [2] Izydorczyk J.: *Pspice Komputerowa symulacja układów elektronicznych*. Helion, 1993.
- [3] Wróbel Z.: *Modelowanie przebiegów napięć generatorów udaru kombinowanego w analizie układów ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń sterowania ruchem kolejowym*. X Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, II Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, październik 2002.
- [4] Laskowski M., Kulawiak A.: *Ochrona przeciwprzepięciowa i przeciwpożarzeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi*. Praca CNTK, nr 1002/24, Warszawa 1994.
- [5] Laskowski M., Małosa R., Wróbel Z. i inni: *Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych*. Praca CNTK (Zakład Telekomunikacji) nr 1049/24, Warszawa, czerwiec 1997.
- [6] BS EN 61000-4-5 2006; *Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test* (IEC 61000-4-5: 2005).
- [7] Bajorek J., Knott M., Wyderka S.: *Modelowanie matematyczne ochronników przepięciowych tlenkowych*. III Sympozjum Metody Matematyczne w Elektroenergetyce, Zakopane, listopad 1993.
- [8] IEEE C62.41.1TM-2002 *IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage AC Power Circuits, including a board database*. Published by Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA, October 11, 1991.
- [9] IEEE Std C62.45TM-2002, *IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits*.
- [10] Jakubowski J.L.: *Podstawy teorii przepięć w układach energoelektrycznych*. PWN, Warszawa 1968.
- [11] Katalog elementów elektryfikacji kolei: cz. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7.1, .2.7.2 – „Linie potrzeb nietrakcyjnych – 15 kV”, cz. 2.8, 2.9, 2.10 – „Stacje transformatorowe zasilające odbiory nietrakcyjne – 15 / 0.4 kV”. Kolprojekt, Warszawa 1990.
- [12] Ziemia R.: *Problemy modelowania przewodów podziemnych jako elementów urządzeń piorunochronnych*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Urządzenia Piorunochronne w Projektowaniu i Budowie”. Kraków 1996.
- [13] SWW 1114-14 1115-72; *Odgromniki zaworowe*. Katalog Wema. Warszawa 1973, s. 3742.
- [14] *Izolatory porcelanowe nisko- i wysokonapięciowe*. Zakłady Porcelany Elektrotechnicznej „Zofiówka”, s. 2.

Magazyn
Telekomunikacja i Sterowanie Ruchem 1/2008

W numerze:

- * Ewolucja sygnalizacji i wprowadzanie ETCS na liniach dużej prędkości w Europie
- * Porównanie europejskich systemów oddziaływania na pociąg
- * Metodyka określania bezpieczeństwa transmisyjnego systemu komunikacyjnego
- * Współpraca pojazdu drogowego typu UPS-80 z urządzeniami kontroli niezajętości toru
- * Telematyka w zarządzaniu kryzysowym w systemach transportowych

Magazyn

Telekomunikacja i Sterowanie Ruchem 1/2008

- Ewolucja sygnalizacji i wprowadzanie ETCS na liniach dużej prędkości w Europie
- Porównanie europejskich systemów oddziaływania na pociąg
- Telematyka w zarządzaniu kryzysowym w systemach transportowych
- Metodyka określania bezpieczeństwa transmisyjnego systemu komunikacyjnego
- Współpraca pojazdu drogowego typu UPS-80 z urządzeniami kontroli niezajętości toru

Telekomunikacja i Sterowanie Ruchem 2/2008

- Bezpieczeństwo ruchu kolejowego w legislacji unijnej
- Integracja systemów bezpieczeństwa transportu – projekt ZEUS
- Analiza bezpieczeństwa w procesach ruchu kolejowego
- Problematyka analizy ryzyka w urządzeniach srk

Zamówienia
EMI-PRESS
90-955 Łódź 8
skr. poczt. 103
tel./fax 042 633 37 51
tts@emipress.com.pl