

Zofia Wróbel

Możliwości stosowania wybranych modeli generatorów udarowych w analizie zagrożeń urządzeń sterowania ruchem kolejowym

Układy zasilania urządzeń sterowania ruchem kolejowym są narażone na występowanie zakłóceń wywołanych bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi w linie zasilające lub powstających w wyniku oddziaływania szybkozmiennych, impulsowych pól elektromagnetycznych, zaburzeń o wartościach porównywalnych z sygnałami użytecznymi. Nieprzewidywalny charakter tych zaburzeń, poprzez zakłócenia w pracy urządzeń elektrycznych i ich zestawów, wywołuje określone szkody [1].

Badania laboratoryjne, mające na celu sprawdzenie skuteczności działania projektowanych układów ochrony przeciwprzepięciowej, są pomiarami decydującymi o dopuszczeniu tych układów do stosowania. W analizie zagrożeń urządzeń sterowania ruchem kolejowym warto więc uwzględnić jako wymuszenie przebiegi napięć i prądów modeli generatorów opracowane na podstawie wyników pomiarów.

Modelowanie źródeł udarów

Badania eksperymentalne modeli udarów przeprowadzono stosując: generator udarowy Haefely PC6-288.1 i filtr Haefely FP 20/3-3.2 [2]. Rejestrację napięć udarów przeprowadzono za pomocą czterokanałowego oscyloskopu cyfrowego LeCroy LS-140, umożliwiającego rejestrację przebiegów w paśmie częstotliwości do 100 MHz, z dokładnością podstawy czasu 0,01%. Oscyloskop zasilono poprzez transformator separujący typu Tma 630S. Do pomiarów zastosowano sondę LeCroy 6 kV, 50 MΩ, 1000:1.

W celu uzyskania udaru napięciowego 10/700 μs stosowano wkładkę PHV 9 z założoną zatyczką na 25 Ω [3]. Rejestrację przebiegów przeprowadzono w paśmie częstotliwości do 100 MHz. Oscyloskop zasilano poprzez transformator separujący. Do pomiarów napięć udarów stosowano kabel koncentryczny i wewnętrzny dzielnik napięcia o wartości 745 Ω, a do pomiaru prądu zastosowano sondę 6 kV, 50 MΩ, umożliwiającą zapis wyników w skali 1000:1. Błąd pomiaru napięcia sondą był nie większy niż ±0,1% dla napięcia stałego i ±2% dla napięcia przemiennego o częstotliwości do 100 MHz.

W badaniach charakterystyk układów ochrony przeciwprzepięciowej i ich elementów składowych ważną rolę odgrywa powtarzalność wymuszeń udarowych. W celu sprawdzenia powtarzalności wyników pomiarów, na wstępie wykonano rejestrację dwudziestu pięciu wymuszeń dla każdego udaru:

- napięciowego 1,2/50 μs dla $U_m = 1$ kV,
- prądowego 8/20 μs $U_m = 1$ kV,
- napięciowego 10/700 μs dla $U_m = 1$ kV.

Wyniki pomiarów zapisywano w formacie zgodnym z PSPI-CE®, wybierając ostatecznie ten pakiet jako podstawowe narzędzie obróbki danych. Metodę oznaczania miar odpowiednich przebiegów napięciowych oparto na zależnościach [4]:

$$\bar{U}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_m(i) \quad (1)$$

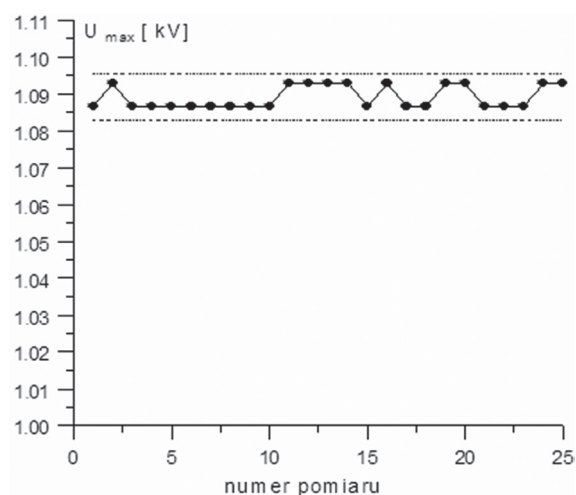
$$\sigma_{U_m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_m(i) - \bar{U}_m)^2}{N - 1}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\bar{U}_m} = \frac{\sigma_{U_m}}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

gdzie:

$U_m(i)$ – wartość maksymalna kolejnego napięcia pomiaru,
 \bar{U}_m – wartość średnia wykonanej serii pomiarów.

Wyniki pomiarów rejestrowano w przedziałach czasowych $\Delta t_i = 0,1 \mu s$. Różnice między maksymalnymi mierzonymi wartościami nastawy na generatorze udaru a maksymalną wartością średnią mieściły się w granicach 1%. Jako wynik końcowy wyznaczono przedział dla wartości: $\bar{U}_m \pm 2\sigma_{\bar{U}_m}$ (rys. 1). W świetle tych wyników, a szczególnie niskich wartości odchylenia standardowego na poziomie 0,3%, uznano powtarzalność wyników badań. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowo wartości maksymalne napięć udaru 10/700 μs dla wykonanej serii pomiarów.



Rys. 1. Wartości maksymalne napięć udaru 10/700 μs dla wykonanej serii 25 pomiarów przy uwzględnieniu przedziału: $\pm 2\sigma_{\bar{U}_m}$ (dwie równoległe linie)

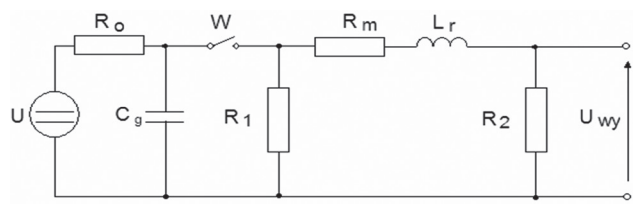
Tabela 1

Wartości parametrów schematu zastępczego generatora (rys. 2) wyznaczone w programie Mathematica 4 oraz ich wartości montażowe

Parametr	Jednostka	Wartość		
		wyznaczona dla danych z pomiaru napięcia [5]	montażowa	wyznaczona dla danych z pomiaru napięcia i prądu [6]
C_g	μF	12,25	12,0	12,000
L_r	μH	22,70	20,0	9,100
R_m	Ω	0,61	0,8	1,302
R_1	Ω	6,81	15,0	7,800
R_2	Ω	25,00	25,0	30,000

Udar kombinowany 1,2/50 μs – 8/20 μs

Zgodnie z definicją podaną w normie, udar kombinowany powinien być zadany z generatora wytwarzającego udar napięciowy 1,2/50 μs dla obwodu otwartego, a udar prądowy 8/20 μs dla obwodu zwartego (PN EN 61000-4-5) [2]. Napięcie, amplituda prądu i kształty udarów, które doprowadza się do badanego urządzenia, wyznaczone są poprzez parametry generatora i impedancję charakterystyczną generatora Z_r . Jest to wartość szczytowa udaru napięciowego przy otwartym obwodzie względem wartości szczytowej udaru prądowego przy obwodzie zwartym. Zwykle dla tego typu generatora wartość Z_r wynosi 2 Ω [2].



Rys. 2. Schemat obwodu generatora udaru kombinowanego
 U - źródło napięcia udaru, R_o - rezystancja obciążenia, C_g - kondensator przejmujący energię udaru, W - wyłącznik, R_m - rezystancja przyjętej impedancji, R_1, R_2 - rezystancje określające czas trwania udaru, L_r - określająca szybkość narastania udaru [2]

Wyznaczenie parametrów generatora udaru kombinowanego 1,2/50 μs – 8/20 μs zrealizowano w programie Mathematica 4 przez wprowadzenie wyników pomiarów napięcia i prądu w pakiecie Statistics'NonLinearFit, stosując metodę Gaussa-Newtona i Levenberga-Marquardta. Dla udaru napięciowego tą metodą można znaleźć różne dane parametrów generatora z rysunku 2. Dodatkowe ograniczenie, jakim jest wartość impedancji charakterystycznej 2 Ω , znacząco zmniejsza liczbę rozwiązań. Konieczność uwzględnienia jednocześnie przebiegu prądu 8/20 μs wymaga dalszego uściślenia zakresu poszukiwanych wartości. Metodę wyznaczenia parametrów generatora udaru kombinowanego na podstawie wyników pomiaru napięcia omówiono w [5], a napięcia i prądu przy uwzględnieniu impedancji charakterystycznej 2 Ω w [6]. Dla przyjętych danych: $C_g = 12 \mu F$, $L_r = 9,1 \mu H$, $R_m = 7,8 \Omega$, $R_1 = 1,302 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$, otrzymano wartość impedancji charakterystycznej 1,994 Ω .

Przebiegi impulsu napięciowego 1,2/50 μs i prądowego 8/20 μs dla parametrów generatora zamieszczonych w tabeli 1 przedstawiono na rysunkach 3 i 4 w programie LTspice przez

wprowadzenie obwodu generatora zgodnie z odpowiednio wyznaczonymi parametrami.

Udar kombinowany 10/ 700 μs

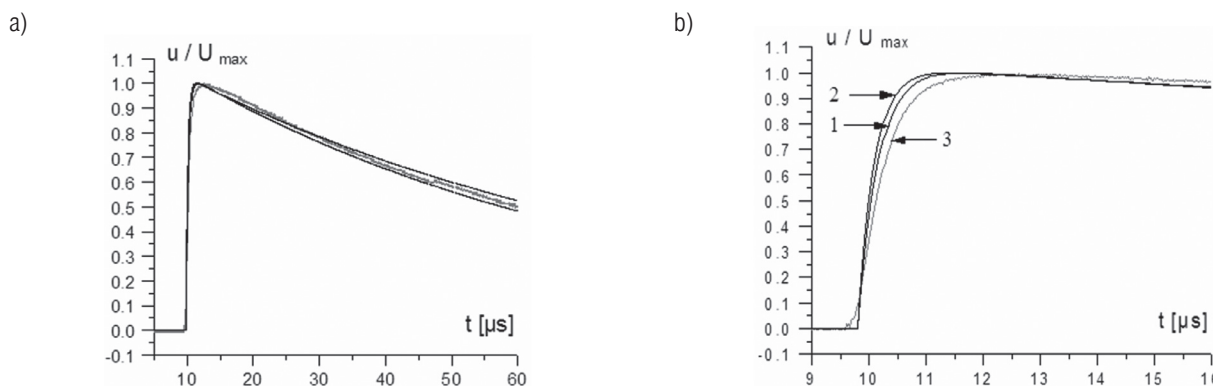
Parametry udaru napięciowego 10/700 μs wyznaczono z zależności [7]:

$$U(t) = 0,10113 U_m [\exp(-0,10068E + 10^4 t) - \exp(-0,64766E + 10^6 t)] \quad (4)$$

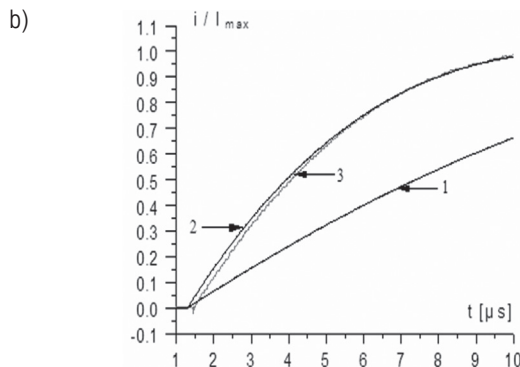
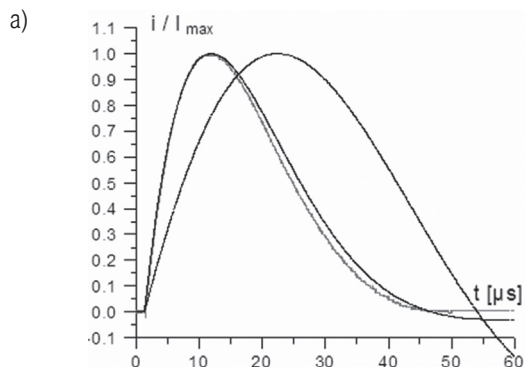
Zamieszczony na rysunku 5a model generatora udaru 10/700 μs zawiera: U – źródło wysokiego napięcia, R_c – rezystor ładujący, C_c – kondensator gromadzący energię (20 μF), R_s – rezystor kształtujący czas trwania impulsu (50 Ω), R_m – rezystory dopasowujące impedancję ($R_{m1} = 15 \Omega$; $R_{m2} = 25 \Omega$), C_s – kondensator kształtujący czas narastania (0,2 μF), S_1 – wyłącznik zamykany, gdy używane są zewnętrzne rezystory dopasowujące.

Na rysunku 5b przedstawiono, dla udaru napięciowego 10/700 μs , przykładowe wyniki z pomiarów i modelowania w programie LTspice otrzymane dla parametrów generatora (rys. 5a) oraz wyznaczone z zależności (4).

W programie LTspice, model udaru opisany zależnością wpisaną w linii (przykład 1): epior2 między węzłami: 1 0 jako wartość: value={...} wyznaczono instrukcją .subckt UDAR jako źródło napięciowe e . Możliwość symulacji udaru w dowolnym czasie uzyskano przez wprowadzenie czasu to (przykładowa wartość: 10 μs). Udar może być doprowadzony deklaracją xp1 do dowolnego węzła badanego elementu, np. do węzła 5 [7].

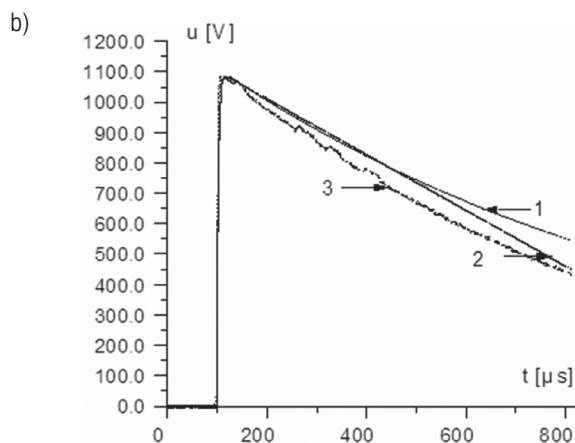
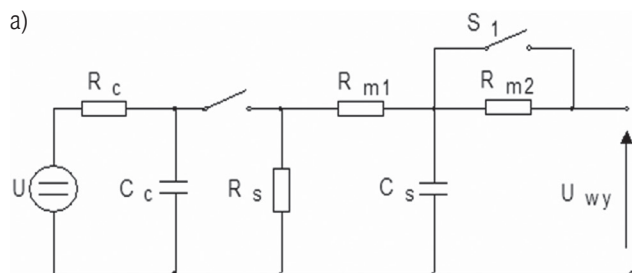


Rys. 3. Otrzymane w programie LTspice przebiegi dla udaru napięciowego 1,2/50 μs
 a) dla generatora udaru kombinowanego w programie Mathematica 4: b) początkowy fragment przebiegu z oznaczeniami linii: 1 – dla danych z pomiaru napięcia [5], 2 – dla danych z pomiaru napięcia i prądu [6], 3 – przebieg z pomiaru



Rys. 4. Otrzymane w programie LTspice przebiegi impulsu prądowego 8/20 μ s

a) dla generatora udaru kombinowanego w programie Mathematica 4; b) początkowy fragment przebiegu z oznaczeniami linii: 1 – dla danych z pomiaru napięcia [5], 2 – dla danych z pomiaru napięcia i prądu [6], 3 – przebieg z pomiaru



Rys. 5. Schemat układu generatora impulsowego 10/700 μ s [2, 7]

b) napięcie udaru 10/700 μ s dla $U_m = 1$ kV: 1 - wyznaczone dla parametrów generatora udarów – rys 5a; 2- napięcie wyznaczone: z zależności (4); 3- otrzymane z pomiaru

Przykład

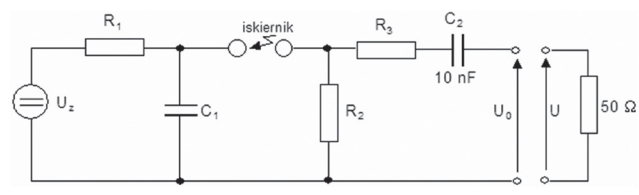
```
.subckt UDAR wy Params: to=10us
epior2 1 0 value = {0.10117E + 04*(1)*(exp(-0.10068E + 04*time)
+ -exp(-0.64766E + 06*time))}
Top 1 0 1f 0 z0 = 100 Td = {to}
Rc 1f 0 100
e wy 0 1f 0 1
.ENDS UDAR
xp1 5 UDAR
```

W stanie zwarcia z generatora udaru napięciowego 10/700 μ s otrzymuje się przebieg prądu 5/320 μ s [7]. W programie EMTP-ATP jest dostępnych do stosowania kilka modeli źródeł napięć i prądów udarowych: Heidler.sup, Standler.sup, Surge.sup [7, 8].

Udar napięciowy 5/50 ns

Przyjęty w normie uproszczony schemat generatora pojedynczego impulsu 5/50 ns przedstawiono na rysunku 6. Dla tego impulsu pomiary wykonano stosując generator Schafner NSG 2050 i oscyloskop Tektronix TDS 3052B. Postać analityczną udaru napięciowego 5/50 ns wyznaczono z zależności [9]:

$$u(t) = 1,27 U_m [\exp(-18 \cdot 10^6 t) - \exp(-303 \cdot 10^6 t)] \quad (5)$$



Rys. 6. Schemat generatora 5/50 ns [9]

U_z – źródło wysokiego napięcia, R_1 – rezystor w obwodzie ładowania, C_1 – kondensator magazynujący energię, R_2 – rezystor kształtowania czasu trwania impulsu, R_3 – rezystor dopasowania impedancji, C_2 – kondensator odcinający składową stałą prądu

Na rysunku 7a przedstawiono przebieg napięcia udaru 5/50 ns, opisany zależnością (5), a na rysunku 7b zamieszczono przebiegi napięć otrzymane w wyniku modelowania zgodnie z zapisem podanym w przykładzie oraz z pomiarów.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i modelowania impulsów napięciowych 1,2/50 μ s, 10/700 μ s i 5/50 ns oraz prądowych 8/20 μ s. Tworzenie tego typu modeli, przy jednoczesnym porównywaniu z wynikami z pomiarów pozwala na prowadzenie analiz badanych układów ochrony przepięciowej. Może również służyć do ich projektowania.

Rozeznane możliwości programu PSPICE zostaną wykorzystane do dalszych prac oraz analizy porównawczej z wynikami uzyskanymi z przeprowadzonych badań eksperymentalnych.



Dokończenie na s. 64 >