

SYMULACJA NUMERYCZNA UDARÓW NAPIĘCIOWYCH DLA MODELU GENERATORA UDAROWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM INDUKCYJNOŚCI

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: 012-6172835, fax: 012- 6345721; e-mail: pawel.zydron@agh.edu.pl; jozef.roehrich@agh.edu.pl

Streszczenie: Generator napięć udarowych stanowi jedno z podstawowych narzędzi badawczych stosowanych w laboratoriach wysokich napięć. Jego zadaniem jest wytworzenie, w celu wykonywania prób i badań, w pełni kontrolowanych i powtarzalnych udarów o różnych parametrach napięciowo-czasowych. Artykuł prezentuje wyniki numerycznej symulacji działania takiego urządzenia, generującego znormalizowane udary piorunowe 1,2/50 [μs/μs]. Analizowano przebiegi czasowe napięć udarowych w oparciu o schemat zastępczy generatora 4-stopniowego – odwzorowującego generator GU-400 zainstalowany w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektroenergetyki AGH. Model uwzględnia zarówno elementy konstrukcyjne, jak również pojemności rozproszenia i indukcyjności własne. Symulacje wykonano w programie *EMTP-ATP*.

Słowa kluczowe: generator udarowy, modelowanie, *EMTP-ATP*.

1. WPROWADZENIE

1.1. Napięcia udarowe – kształty i parametry

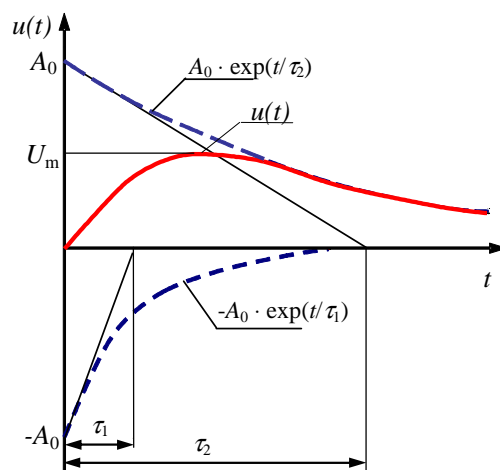
Napięcia udarowe to przebiegi o charakterze impulsowym, z reguły o określonej biegunowości, mające również niekiedy cechy sygnałów oscylacyjnych. W technice wysokich napięć są one stosowane do odwzorowania w warunkach laboratoryjnych kształtu rzeczywistych narażeń napięciowych, którym poddawane są układy izolacyjne urządzeń elektrycznych. Dwie podstawowe grupy udarów obejmują udary *piorunowe* oraz *łączeniowe*. Artykuł opisuje zagadnienia modelowania pierwszych z nich.

Bez względu na miejsce i cel wykonywania prób napięciem udarowym *LI* (ang. *Lightning Impulse*) powinna istnieć możliwość porównania ich kształtów oraz podstawowych parametrów napięciowo-czasowych. Z tego powodu w normach międzynarodowych i krajowych definiowane są i standaryzowane kształty i parametry udarów [1-3]. Dla udaru *piorunowego pełnego* przyjmuje się, że można go odwzorować krzywą dwuwykładniczą (rys.1) opisaną równaniem [4, 5]:

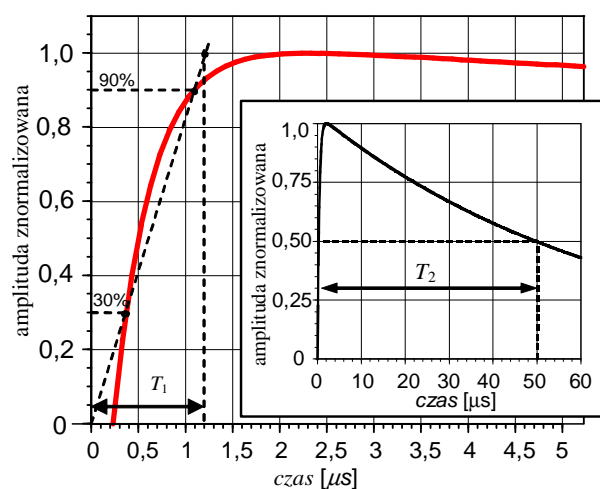
$$u(t) = A_0 \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

gdzie: A_0 – amplituda odniesienia; α , β – stałe czasowe funkcji wykładniczych, przy czym dla znormalizowanego udaru piorunowego 1,2/50 parametry te wynoszą [6]:

$$A_0 = 1,037264 \text{ j.u.}, \\ \alpha = 14659 \text{ s}^{-1} (\tau_2 = 1/\alpha \approx 68,22 \text{ } \mu\text{s}), \\ \beta = 2468000 \text{ s}^{-1} (\tau_1 = 1/\beta \approx 0,405 \text{ } \mu\text{s}).$$



Rys.1. Udar napięciowy piorunowy jako krzywa dwuwykładnicza



Rys.2. Udar piorunowy 1,2/50 μs – kształt i definicje podstawowych parametrów

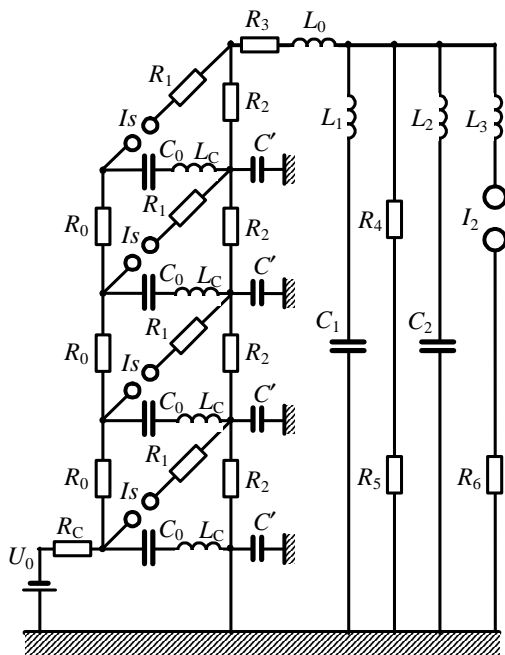
Kształt znormalizowanego udaru pełnego oraz specyficzny, wynikający z obowiązujących norm sposób określenia jego podstawowych parametrów czasowych –

czasu czoła T_1 oraz czasu do półszczytu T_2 przedstawiono na rysunku 2. Umowny początek udaru jest wyznaczany jako punkt przecięcia osi czasu z prostą przechodzącą przez punkty położone na krzywej udarowej, odpowiadające 30% i 90% wartości szczytowej udaru U_m . Poza udarem pełnym wyróżnić można: udary ucięte na czole (trójkątne) bądź na grzbiecie (prostokątne).

1.1. Budowa generatora napięć udarowych

Generator napięć udarowych jest urządzeniem względnie prostym w swej konstrukcji, którego działanie jest oparte na pewnych podstawowych zjawiskach fizycznych, zachodzących w elementach i obwodach elektrycznych. Pomimo to analiza jego pracy może być zadaniem dość skomplikowanym.

W większości przypadków dla uzyskania wymaganych napięć probierczych, o odpowiednio dużych wartościach szczytowych, stosowane są konstrukcje wielostopniowe oparte na pomysłe Erwina Marxa, opatentowanym w 1923 roku [7]. Rozszerzony schemat zastępczy generatora 4-stopniowego, uwzględniający zarówno elementy konstrukcyjne, jak i występujące w nim pojemności rozproszenia i indukcyjności własne, przedstawiono na rysunku 3.

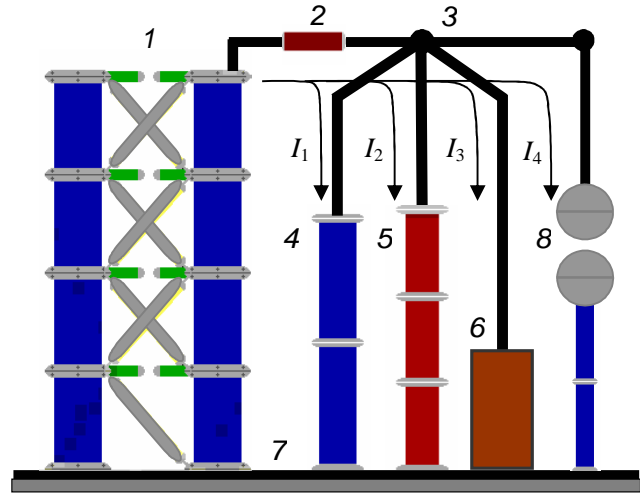


Rys. 3. Rozszerzony schemat zastępczy generatora napięć udarowych

Analizując pracę takiego generatora można wyróżnić dwie podstawowe fazy:

- I. ładowania pojemności głównych C_0 – w układzie równoległym – poprzez rezystor R_C i szereg rezystorów R_0 . Stałe czasowe ładowania kondensatorów C_0 (które dodatkowo mogą posiadać indukcyjności własne L_C) są do siebie zbliżone ze względu na zachowanie relacji $R_C \gg R_0$.
- II. rozładowania pojemności głównych C_0 – w układzie szeregowym – podczas której następuje generacja udaru napięciowego na równolegle połączonych pojemnościach kondensatora czołowego C_1 i obiektu badanego C_2 . Przełączenie układu połączeń kondensatorów

C_0 z połączenia równoległego w szeregowo odbywa się za pomocą iskierników międzystopniowych I_s (które dodatkowo można opisać wartościami pojemności własnych).



Rys. 4. Generator GU-400 – układ połączeń głównych elementów składowych

Na rysunku 4 przedstawiono wzajemne usytuowanie podstawowych elementów składowych generatora GU-400. W swej głównej części generacyjnej (1) stanowi on konstrukcję 4-stopniową o budowie 2-kolumnowej, co daje układ o zminimalizowanej indukcyjności własnej [8]. W tym przypadku zaniedbać można indukcyjności własne i wzajemne poszczególnych stopni, a zasadniczy wpływ na wartość wypadkową indukcyjności własnej ma indukcyjność ramki przekroju pionowego generatora utworzonej przez kolumny części generacyjnej i gałąź pojemności obciążenia. Elementami zaznaczonymi na rysunku są ponadto: rezystor tłumiący (2), doprowadzenia wysokonapięciowe (3), kondensator czołowy (4), dzielnik szerokopasmowy (5), obiekt badany (6) oraz system wspólny masy uziemienia (7). Regulowany, zewnętrzny iskiernik kulowy o dużej średnicy (8) służy do uzyskania przebiegów udarowych uciętych na czole.

Przebieg napięcia udarowego podawanego z doprowadzeń wysokonapięciowych na obiekt badany jest zależny od wartości i konfiguracji przestrzennej poszczególnych elementów składowych generatora. Zasadniczy wpływ na obecność i wielkość przewyższeń oraz oscylacji w napięciu udarowym mają indukcyjności własne i wzajemne występujące w części generacyjnej, indukcyjności pętli zewnętrznych (związanych z prądami $I_1 + I_4$ z rysunku 4) oraz pojemności sprzężeń pasożytniczych.

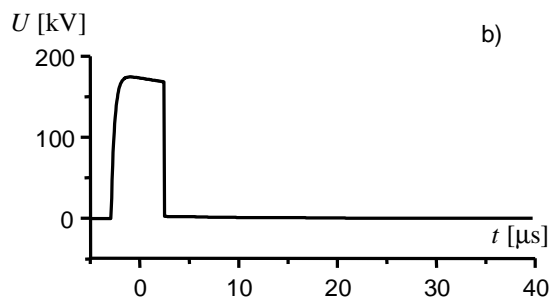
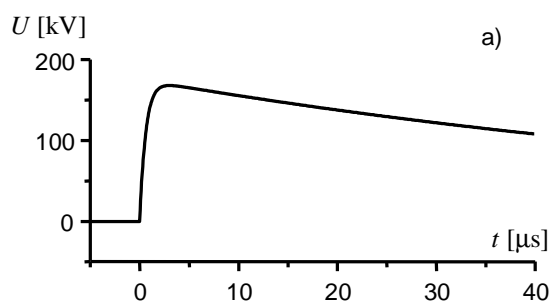
2. MODELOWANIE W PROGRAMIE EMTP-ATP

W celu dokonania analizy wpływu poszczególnych elementów modelu generatora na kształt i parametry wytwarzanych udarów napięciowych piorunowych przeprowadzono symulacje numeryczne w programie EMTP-ATP [9]. Program umożliwia otrzymanie wyników przebiegów czasowych zarówno w postaci graficznej jak i w postaci plików tekstowych. Na rysunkach od 5 do 8 przedstawiono wpływ wartości wybranych elementów schematu zastępczego na kształt generowanych udarów. Wartości elementów konstrukcyjnych przedsta-

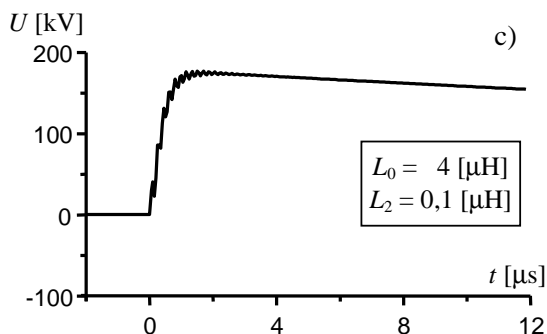
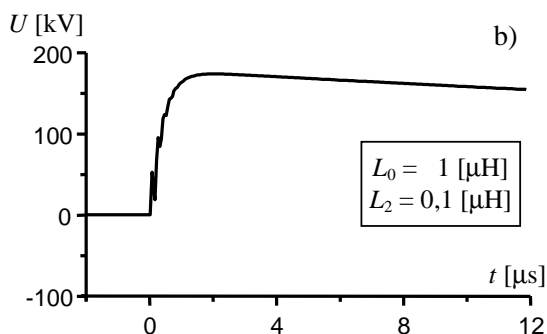
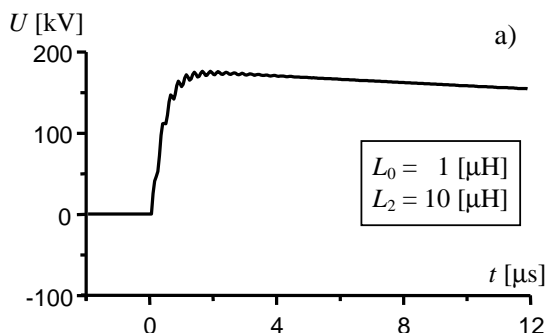
wionych na schemacie rozszerzonym (rys. 3) wynoszą: $C_0=541\text{ nF}$, $C_1=5\text{ nF}$, $R_c=100\text{ k}\Omega$, $R_0=5\text{ k}\Omega$, $R_1=10,8\ \Omega$, $R_2=146\ \Omega$, $R_3=28\ \Omega$, $R_4=7,5\text{ k}\Omega$, $R_5 \ll R_4$. Podczas modelowania dokonywano zmian szacowanych wartości elementów pasożytniczych i analizowano ich wpływ na zmianę kształtu krzywej udarowej. Zestawienie wartości modyfikowanych elementów przedstawiono w tabeli 1, a przykładowe wyniki modelowania w postaci przebiegów czasowych uzyskanych uderzeń na rysunkach od 5 do 8.

Tabela 1. Zestawienie wartości elementów dla wybranych przebiegów uderzeń

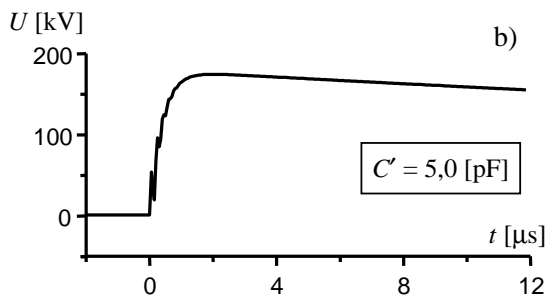
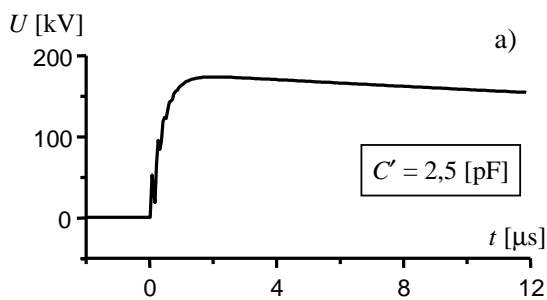
N	C''		L_0	L_1	L_2	L_3
	[pF]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
r						
rys.						
Udary pełne						
5a	0	0	0	0	0	-
6a	2,5	0,001	0,001	0,001	0,01	-
6b	2,5	0,001	0,001	0,001	0,0001	-
6c	2,5	0,004	0,001	0,001	0,0001	-
7a	2,5	0,001	0,001	0,001	0,0001	-
7b	5,0	0,001	0,001	0,001	0,0001	-
Udary ucięte na grzbiecie						
5b	0	0	0	0	0	0
8a	2,5	0,004	0,001	0,001	0,0001	0,005
8b	2,5	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,005
8c	2,5	0,001	0,001	0,001	0,0001	0,010



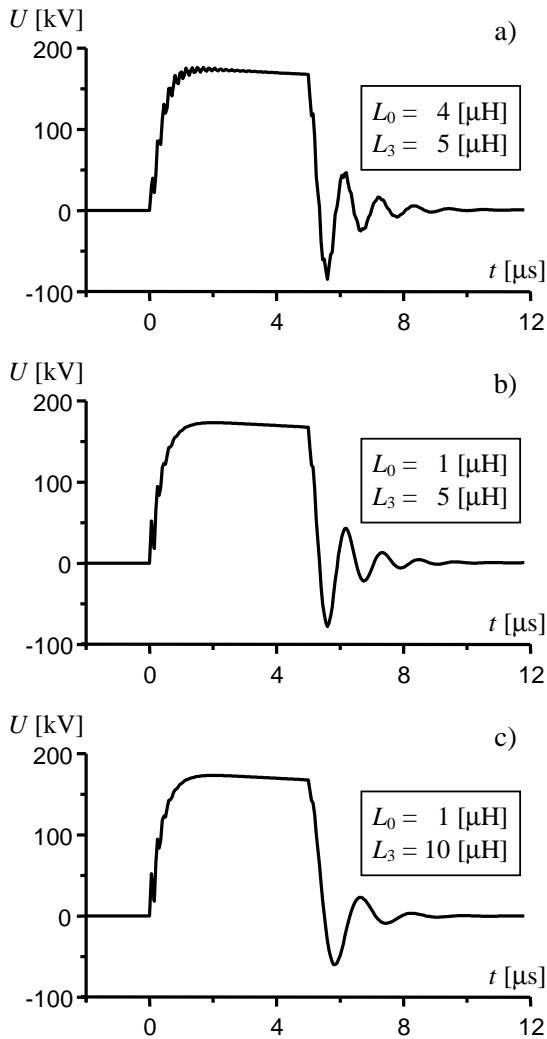
Rys. 5. Przebiegi czasowe uderu pełnego (a) oraz uderu uciętego na grzbiecie (b) modelowane dla schematu podstawowego generatora GU-400



Rys. 6. Przebieg czasowy uderu pełnego – wpływ indukcyjności L_0 i L_2



Rys. 7. Przebieg czasowy uderu pełnego – wpływ pojemności doziemnych C'



Rys. 8. Przebieg czasowy udaru uciętego – wpływ indukcyjności L_0 i L_3

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Pomimo prostoty swej konstrukcji, ze względu na parametry czasowe generowanych przebiegów, generator napięć udarowych jest obiektem złożonym. Pojemności oraz indukcyjności własne generatora wpływają w sposób zasadniczy na kształt generowanych impulsów.

Analiza numeryczna złożonego modelu generatora napięć udarowych uwzględniającego dodatkowe elementy R , L , C (nieobecne na schemacie podstawowym), pozwala na identyfikację przyczyn zmian kształtu generowanych udarów.

W przypadku analizy udarów generowanych podczas wykonywania badań obiektów rzeczywistych niezbędne jest również uwzględnienie wpływu ich konstrukcji i parametrów. Jeżeli podczas prób dochodzi do wystąpienia wewnętrznych uszkodzeń wówczas dodatkowo podczas modelowania należy brać pod uwagę występowanie efektów niestacjonarności sygnałów spowodowanej czasową zmiennością topologii schematu zastępczego oraz wartości poszczególnych jego elementów. Podczas analizy tego typu przypadków rejestrowane przebiegi udarów napięciowych muszą być analizowane przy zastosowaniu metod czasowo-częstotliwościowych np. krótkoczasowego przekształcenia Fouriera lub przekształcenia falkowego [10]. Komplikuje to proces modelowania i wymusza rozbudowę schematu zastępczego układu *generator-obiekt_badany*.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Polska Norma PN-92/E-04060: Wysokonapięciowa technika probiercza. Ogólne określenia i wymagania probiercze, 1992
2. IEC 60060-1 (1989-11) – High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements, ed. 2.0
3. IEEE Std 4-1995 – IEEE Standard Techniques For High-voltage Testing
4. Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, ISBN: 83-89388-01-4, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2003
5. Flisowski Z., Technika wysokich napięć, WNT, ISBN: 83-204-23, 1999
6. Brede A.P., Werle P., Gockenbach E., Borsi H. – A new method of determining the mean curve of lightning impulses according to IEC 60060-1, Proc. 11th ISH, paper 1.74.S21, IEC Publ. No. 467, 1999
7. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., High voltage engineering - Fundamentals, 2nd ed., Newness Press, ISBN: 978-0750636346, 2000
8. Babikow M.A., Komarow N.S., Siemiejew A.S., Technika wysokich napięć, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1967
9. Alternative Transient Program Rule Book – Electronic Edition in PDF format, www.eeug.org, (09.01.2006.)
10. Zydroń P., Przekształcenie falkowe w pomiarach wysokonapięciowych, Zeszyt Specjalny Przeglądu Elektrotechnicznego, Rok LXXVIII, PL ISSN 033-2097 str. 319-322, 2002

NUMERICAL SIMULATION OF LIGHTNING IMPULSES IN LIGHTNING GENERATOR MODEL WITH INDUCTANCES

The paper presents results of numerical modeling of lightning voltage impulses used in laboratory conditions for testing of high voltage insulating systems. After short description of lightning impulse and its main parameters equivalent circuit scheme of the Marx-type generator GU-400 installed in High Voltage Laboratory of the Electrical Power Engineering Department at the AGH University Science and Technology (Krakow) is presented. Extended circuit diagram of the generator is simulated in *EMTP-ATP* program and influence of stray capacitances and self inductances on produced lightning voltages waveforms is analysed.