

WYTWARZANIE I NUMERYCZNE MODELOWANIE UDARÓW NAPIĘCIOWYCH PIORUNOWYCH

STRESZCZENIE

W artykule opisano zagadnienia związane z wytwarzaniem i modelowaniem udarów napięciowych piorunowych, stosowanych w warunkach laboratoryjnych do wykonywania prób i badań wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Po krótkim opisie rodzajów udarów, ich parametrów i podstawowych układów wytwarzania, dokonano numerycznej analizy pracy układu generatora wielostopniowego na przykładzie generatora GU-400 zainstalowanego w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektroenergetyki AGH w Krakowie. Modelując w programie ATP-EMTP rozszerzony schemat zastępczy tego generatora, zaprezentowano wpływ pojemności rozproszenia i indukcyjności własnych, wynikających z geometrycznej konfiguracji jego konstrukcji, na kształt generowanych udarów piorunowych.

Słowa kluczowe: generator napięć udarowych, modelowanie udarów piorunowych, program ATP-EMTP

GENERATION AND NUMERICAL MODELLING OF LIGHTNING VOLTAGE IMPULSES

The paper presents topics connected to generation and modelling of lightning voltage impulses used in laboratory conditions for testing of high voltage insulating systems. After short description of kinds of lightning impulses, main parameters and basic generation units, numerical analysis of the Marx-type GU-400 generator installed in High Voltage Laboratory of the Electrical Power Engineering Department at the AGH University of Science and Technology (Krakow) is presented. After modelling of extended circuit diagram of the generator in ATP-EMTP program influence of stray capacitances and self inductances (originated from the generator construction geometry) on produced lightning voltages waveforms is analyzed.

Keywords: lightning voltage generator, lightning pulses modelling, the ATP-EMTP program

1. WPROWADZENIE

Wysokonapięciowe układy izolacyjne urządzeń elektrycznych stosowanych w elektroenergetyce są podczas swej eksploatacji poddawane oddziaływaniu różnego rodzaju narażeń. Pewną grupę tych narażeń stanowią przepięcia o charakterze udarów napięciowych piorunowych, będące skutkiem bezpośredniego lub pośredniego wpływu wyładowań atmosferycznych – piorunów. Z tego powodu zachodzi uzasadniona konieczność wykonywania prób oraz badań konstrukcyjnych i odbiorczych układów izolacyjnych urządzeń, które mogą podlegać takim oddziaływaniom. Próbom są poddawane materiały izolacyjne, izolatory, układy izolacyjne łączników, transformatorów, maszyn wirujących, kabli itp. Ich celem jest weryfikacja poprawności konstrukcyjnej danego typu urządzenia lub konkretnego wyrobu poprzez sprawdzenie wytrzymałości elektrycznej jego układu izolacyjnego napięciem probierczym o określonym kształcie i wartości. Niekiedy wykonywane są badania bardziej szczegółowe, polegające np. na określeniu spodziewanych statystycznych wartości napięć przebicia albo przeskoku.

Aby zapewnić możliwość porównania wyników prób wykonywanych w różnych laboratoriach, w normach międzynarodowych i krajowych definiowane i standaryzowane są kształty i parametry sygnałów testowych [1–3]. Dla napięcia udarowego piorunowego przyjmuje się, że może być ono odwzorowane 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 tłumienia funkcji wykładniczych, przy czym dla normalizowanego udaru piorunowego 1,2/50 $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ parametry te wynoszą [6]:

$$A_0 = 1,037264 \text{ j.u.},$$

$$\alpha = 14659 \text{ s}^{-1} \quad (\tau_2 = 1/\alpha \cong 68,22 \mu\text{s}),$$

$$\beta = 2468000 \text{ s}^{-1} \quad (\tau_1 = 1/\beta \cong 0,405 \mu\text{s}).$$

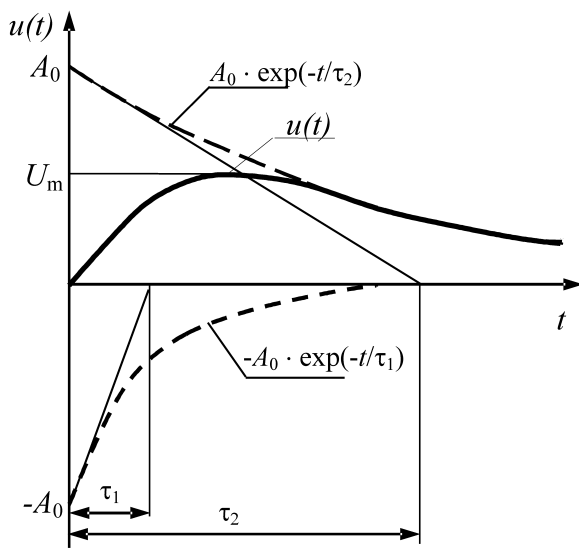
Kształt udaru znormalizowanego pełnego oraz specyficzny, wynikający z obowiązujących norm, sposób określenia jego podstawowych parametrów czasowych – czasu czoła T_1 oraz czasu do półszczytu T_2 , przedstawiono na rysunku 2. Umowny początek udaru jest wyznaczany jako punkt przecięcia osi czasu z prostą przechodzącą przez punkty położone na krzywej udarowej, odpowiadające 30% i 90% wartości szczytowej udaru U_m .

Poza udarami pełnymi w badaniach są stosowane i rejestrowane dwa rodzaje udarów uciętych:

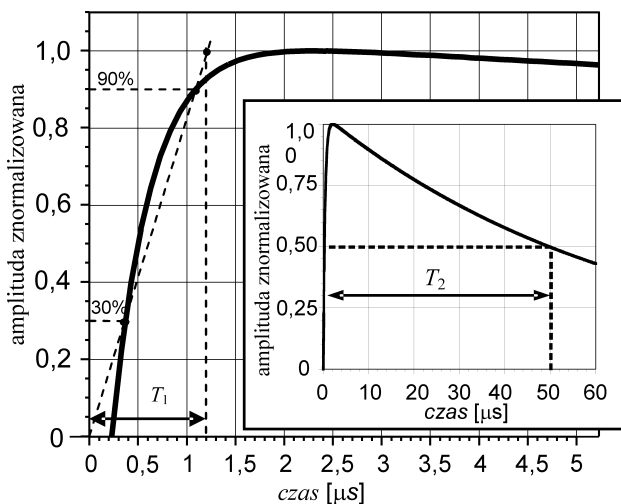
- 1) udary ucięte na czole (rys. 3),
- 2) ucięte na grzbiecie (rys. 4).

Dla tych udarów podstawowym wyznaczanym parametrem czasowym jest tzw. czas do ucięcia T_c .

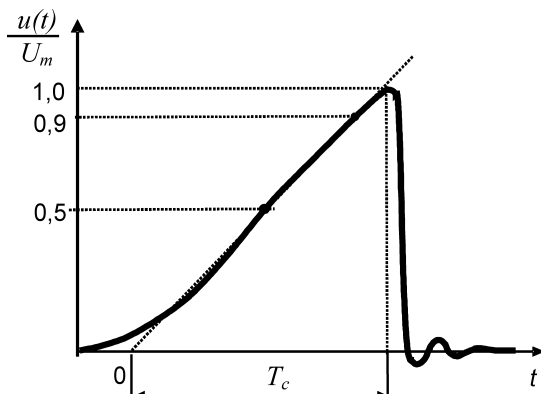
* Katedra Elektroenergetyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie



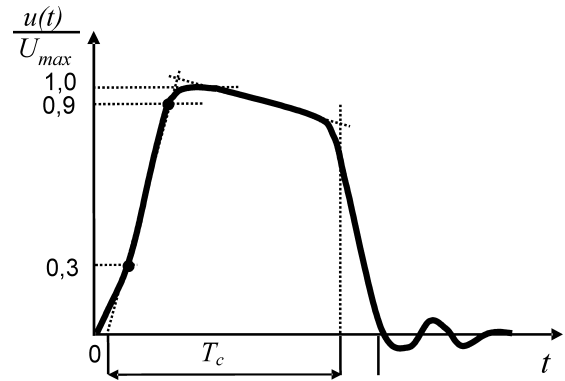
Rys. 1. Udar napięciowy piorunowy jako krzywa dwuwykładnicza



Rys. 2. Udar piorunowy znormalizowany 1,2/50 – kształt i definicje czasów T_1 i T_2



Rys. 3. Udar piorunowy ucięty na czole



Rys. 4. Udar piorunowy ucięty na grzbiecie

Należy zaznaczyć, że udar pełny przedstawiony na rysunkach 1 i 2 stanowi jedynie pewną modelową idealizację uderów wytwarzanych w warunkach laboratoryjnych. W rzeczywistości są wytwarzane i rejestrowane przebiegi kształtów odbiegających od przedstawionego. Zasadniczo można wyróżnić cztery podstawowe rodzaje kształtu udaru pełnego:

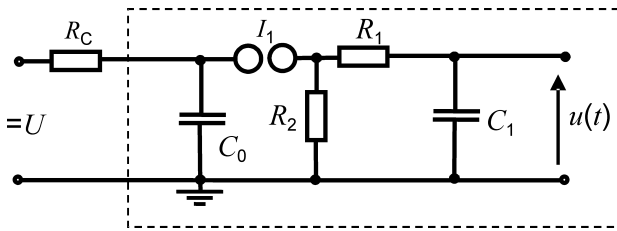
- 1) udar gładki,
- 2) udar z oscylacjami lub przewyższeniem w obszarze szczytu,
- 3) udar z oscylacjami na czole,
- 4) udar z oscylacjami w obszarze czoła i szczytu.

Dodatkowo, rejestrowane udary są zniekształcane przez obecność szumów i zakłóceń oraz niedoskonałości toru pomiarowego, związane ze statycznymi i dynamicznymi właściwościami poszczególnych jego bloków. Z tych powodów na forum międzynarodowym były i są nadal prowadzone prace zmierzające do zmiany dotychczasowych zapisów odpowiednich aktów normalizacyjnych, określających właściwości urządzeń rejestrujących oraz sposoby przetwarzania i analizy sygnałów uderowych [7, 8].

Pomiary i rejestracje uderów wykonywane są obecnie przy użyciu technik analogowo-cyfrowych, dostarczających wyniki w postaci numerycznej. W związku z tym w celu właściwego wyznaczenia parametrów uderów stosuje się dedykowane oprogramowanie komputerowe. Norma IEC-61083-2 [9] określa wymagania dla tego typu oprogramowania analitycznego, a jej integralną częścią jest program generujący dane numeryczne kilkunastu uderów referencyjnych, które są stosowane w celu weryfikacji poprawności działania algorytmów obliczeniowych. Przykładem tego typu oprogramowania jest program *GU-400BS* powstały i stosowany w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektroenergetyki AGH. Program napisany w środowisku programowania graficznego *LabVIEW* firmy National Instruments wyznacza parametry uderów na podstawie krzywej modelowej dopasowanej do danych pomiarowych metodą Levenberga–Marquardta [10, 11].

2. GENERATORY UDARÓW PIORUNOWYCH

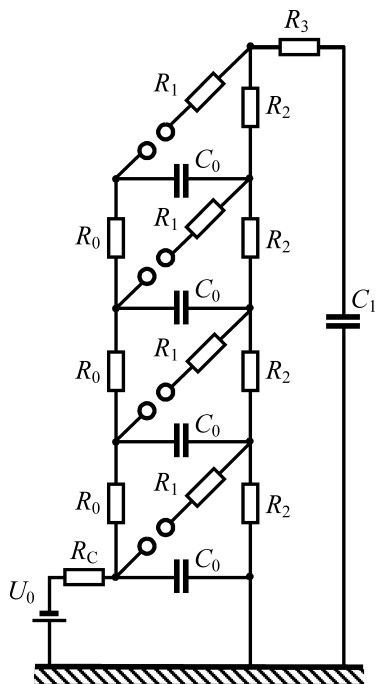
Generatory napięć uderowych piorunowych budowane są jako jedno- lub wielostopniowe [4, 5, 12]. Na rysunku 5 przedstawiono podstawowy schemat zastępczy generatora jednostopniowego.



Rys. 5. Podstawowy schemat ideowy jednostopniowego generatora napięć uderowych

Pojemność główna generatora C_0 jest ładowana napięciem stałym przez rezystor R_C o dużej wartości, co pozwala na uzyskanie długiego czasu ładowania. Gdy napięcie na pojemności osiągnie wartość napięcia przeskoku określoną dla iskiernika I_1 , zapoczątkowany zostaje proces generacji uderu. W pierwszej fazie – formowania czoła uderu – następuje ładowanie pojemności czołowej C_1 poprzez rezystor R_1 . Po zrównaniu napięć na pojemnościach rozpoczyna się faza druga – formowania opadającego grzbietu uderu – gdy następuje rozładowanie obu pojemności. Czas trwania czoła oraz czas do półszczytu są zależne od wartości i wzajemnych relacji pomiędzy wartościami poszczególnych elementów ($C_0 > C_1$ oraz $R_1 < R_2$).

W większości przypadków w celu uzyskania wymaganych napięć probierczych, o odpowiednio dużych wartościach napięć szczytowych, stosowane są konstrukcje wielostopniowe oparte na pomysłu Erwina Marxa, opatentowanym w roku 1923 [12]. Schemat ideowy generatora 4-stopniowego, bez uwzględnienia pojemności rozproszenia i indukcyjności własnych, przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Podstawowy schemat ideowy 4-stopniowego generatora Marxa

Podczas pracy takiego generatora można wyróżnić dwie główne fazy:

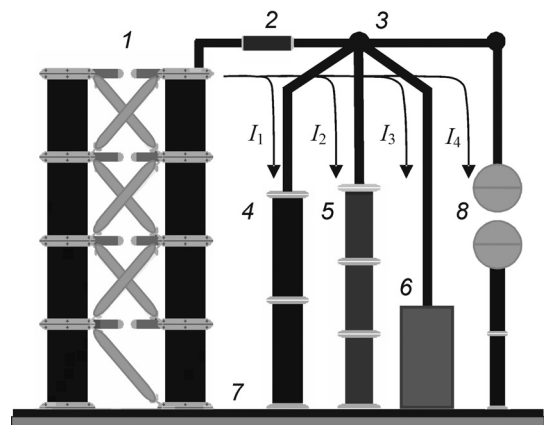
Faza I – ładowanie pojemności głównych C_0 – w układzie równoległym poprzez rezystor R_C i szereg rezystorów R_0 . Stałe czasowe ładowania kondensatorów C_0 są do siebie zbliżone ze względu na zachowanie relacji $R_C \gg R_0$.

Faza II – rozładowanie pojemności głównych C_0 – w układzie szeregowym. Podczas tej fazy następuje generacja uderu napięciowego na pojemności obciążenia C_1 . Przełączenie układu połączeń kondensatorów z połączenia równoległego w szeregowo odbywa się za pomocą iskierników międzystopniowych I_1 .

Na rysunku 7 przedstawiono zdjęcie generatora GU-400 zainstalowanego w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektroenergetyki AGH, a rysunek 8 pokazuje schematycznie narysowane wzajemne usytuowanie jego podstawowych elementów składowych – numerowanych od 1 do 8.



Rys. 7. Generator GU-400 – widok konstrukcji

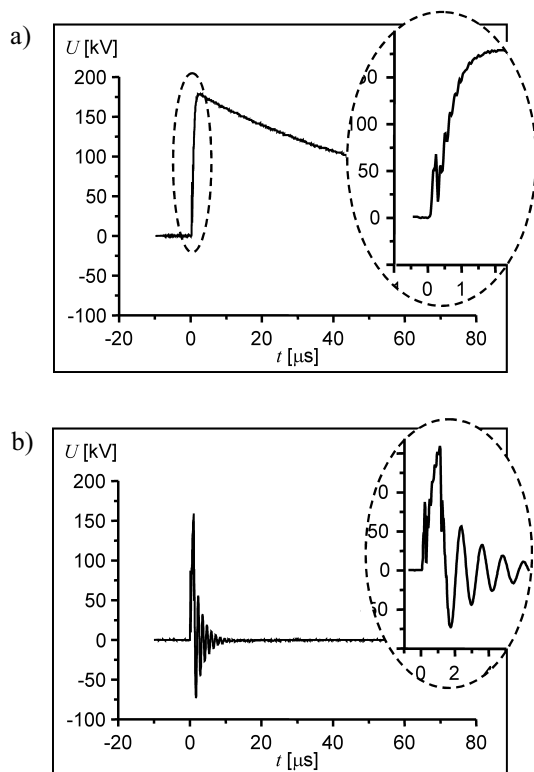


Rys. 8. Generator GU-400 – układ połączeń głównych elementów składowych
Objaśnienia w tekście

W swej głównej części generacyjnej (1) stanowi on konstrukcję 4-stopniową o budowie 2-kolumnowej, co daje układ o zminimalizowanej indukcyjności własnej [13]. 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 8 są ponadto: rezystor tłumiący (2), doprowadzenia wysokonapięciowe (3), kondensator czołowy (4), dzielnik szerokopasmowy (5), obiekt badany (6) oraz system wspólnej 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 i oscylacji w napięciu udarowym mają indukcyjności własne i wzajemne występujące w części generacyjnej, indukcyjności pętli zewnętrznych (związanych z prądami I_1+I_4 z rys. 8) oraz pojemności sprzężeń pasożytniczych.

Na rysunku 9 przedstawiono rzeczywiste przebiegi napięć udarowych zarejestrowane podczas generacji udaru pełnego i uciętego w generatorze GU-400. Na czole udaru obecna jest tłumiona oscylacja o częstotliwości przekracza-

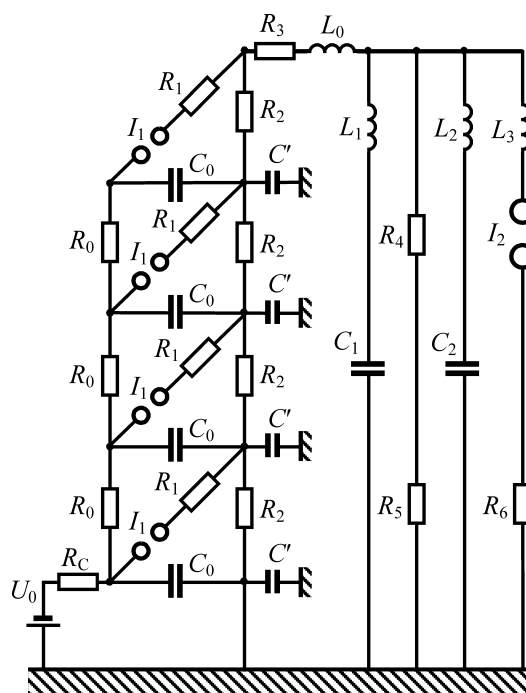


Rys. 9. Zarejestrowane przebiegi napięć udaru:
 a) pełnego; b) uciętego na czole

jącej 500 kHz, co zgodnie z obecnie obowiązującymi normami [1–3] ma wpływ na sposób określania parametrów udaru. Udar ucięty charakteryzuje silna oscylacja, której parametry są zależne od wielkości indukcyjności własnych wynikających z konstrukcji generatora.

3. MODELOWANIE UDARÓW PIORUNOWYCH

W celu wykonania modelowania przebiegów napięć udarowych piorunowych generowanych w układzie rzeczywistego generatora rozszerzono schemat podstawowy (rys. 6), uwzględniając możliwość występowania szeregu elementów dodatkowych. Wartości poszczególnych **elementów konstrukcyjnych** generatora, przedstawionych na schemacie rozszerzonym (rys. 10), wynoszą: $C_0 = 541$ nF, $C_1 = 5$ nF, $R_c = 100$ k Ω , $R_0 = 5$ k Ω , $R_1 = 10,8$ Ω , $R_2 = 146$ Ω , $R_3 = 28$ Ω , $R_4 = 7,5$ k Ω , $R_5 \ll R_4$. Poza tymi elementami, w schemacie rozszerzonym uwzględnić należy również pojemności poszczególnych stopni kondensatorowych względem uziemionego zewnętrznego ekranu generatora C' , indukcyjności własne głównych pętli i elementów konstrukcyjnych, pojemność i indukcyjność własną obiektu badanego C_2-L_2 (rys. 10). Przy dalszym uszczegółowieniu schematu można również wziąć pod uwagę np. pojemności iskierników międzystopniowych.

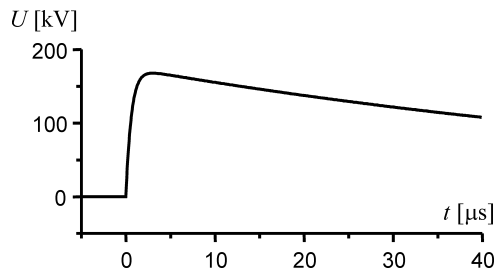


Rys. 10. Rozszerzony schemat zastępczy generatora napięć udarowych

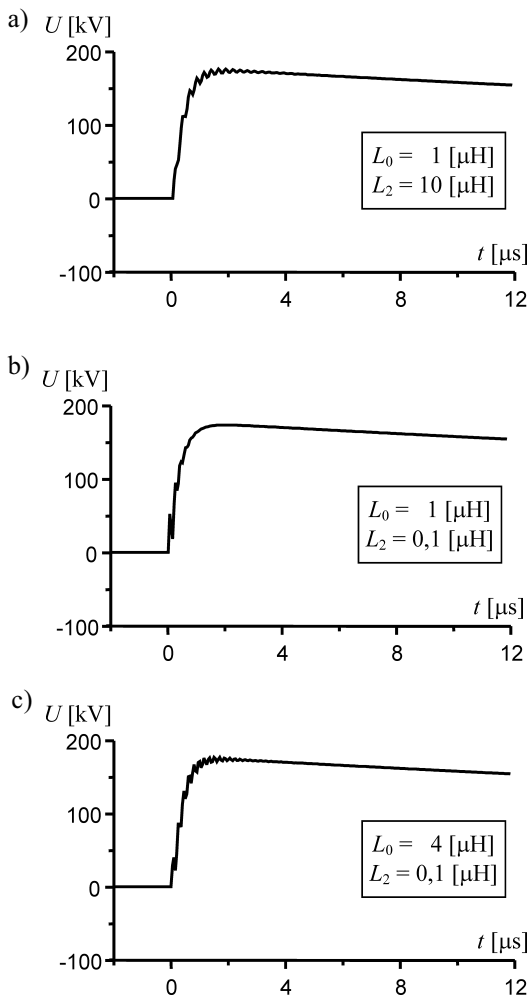
Do modelowania przebiegów udarowych uzyskiwanych w rozszerzonym schemacie zastępczym (rys. 10) zastosowano program ATP-EMTP [14]. Na rysunkach 11–16 przedstawiono rezultaty symulacji dla różnych konfiguracji i wartości elementów schematu zastępczego generatora, dla

udarów pełnych i uciętych na grzbiecie. Aby zobrazować wpływ poszczególnych elementów dodatkowych na zmianę kształtu udarów przeprowadzono symulacje dla wybranych, indywidualnych przypadków (tab. 1).

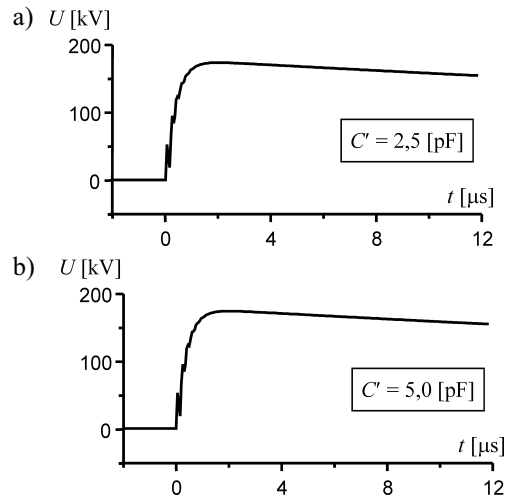
Aby uzyskać możliwość porównania wyników poszczególnych symulacji, przyjęto, że przeskoki na iskiernikach międzystopniowych następują, gdy napięcie na kondensatorach C_0 jest równe 50 kV.



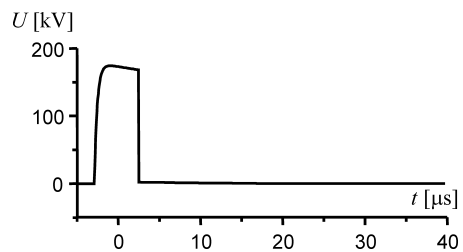
Rys. 11. Przebieg czasowy udaru pełnego modelowany dla schematu podstawowego generatora



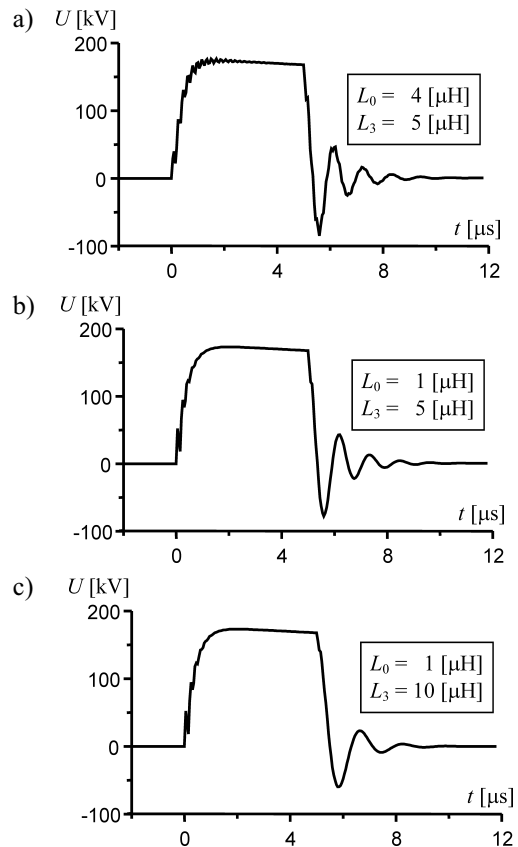
Rys. 12. Przebieg czasowy udaru pełnego – wpływ indukcyjności L_0 i L_2



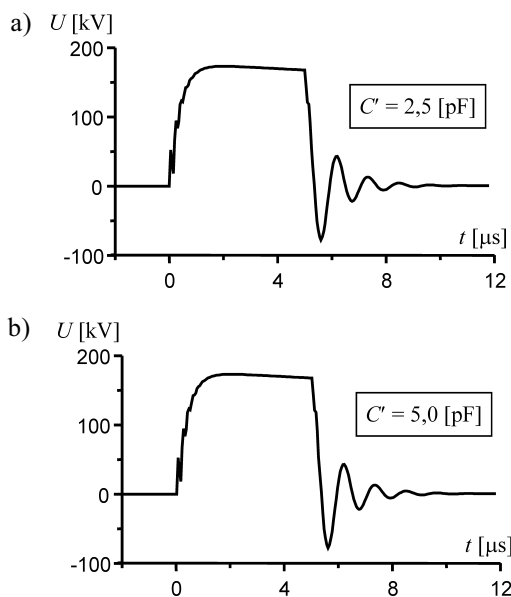
Rys. 13. Przebieg czasowy udaru pełnego – wpływ pojemności doziemnych C'



Rys. 14. Przebieg czasowy udaru uciętego modelowany dla schematu podstawowego generatora



Rys. 15. Przebieg czasowy udaru uciętego – wpływ indukcyjności L_0 i L_3



Rys. 16. Przebieg czasowy udaru uciętego – wpływ pojemności doziemnych C'

Tabela 1

Zestawienie wartości elementów dla wybranych przebiegów udarów

Nr rysunku	C''	L_0	L_1	L_2	L_3
	[pF]	[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
Udary pełne					
11	0	0	0	0	–
12a	2,5	0,001	0,001	0,01	–
12b	2,5	0,001	0,001	0,0001	–
12c	2,5	0,004	0,001	0,0001	–
13a	2,5	0,001	0,001	0,0001	–
13b	5,0	0,001	0,001	0,0001	–
Udary ucięte na grzbiecie					
14	0	0	0	0	0
15a	2,5	0,004	0,001	0,0001	0,005
15b	2,5	0,001	0,001	0,0001	0,005
15c	2,5	0,001	0,001	0,0001	0,010
16a	2,5	0,001	0,001	0,0001	0,005
16b	5,0	0,001	0,001	0,0001	0,005

4. PODSUMOWANIE

Pomimo prostoty swej konstrukcji, ze względu na wymagane parametry czasowe generowanych przebiegów, wielostopniowy generator napięć udarowych piorunowych jest obiektem złożonym. Pojemności konstrukcyjne i pojemności rozproszenia oraz indukcyjności własne obwodów generatora wpływają w sposób zasadniczy na kształt generowanych udarów.

Analiza numeryczna złożonego modelu generatora uwzględniającego dodatkowe elementy R , L , C – nieobecne na schemacie podstawowym, pozwala na identyfikację możliwych przyczyn zmian kształtu generowanych impulsów. Równocześnie określić można rodzaj i wielkości tych zmian w zależności od wartości poszczególnych elementów.

Należy zauważyć, że w czasie prób napięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia (np. transformatorów) może dochodzić do występowania w układzie izolacyjnym lokalnych uszkodzeń, co jest zjawiskiem dynamicznym i wymaga stosowania specjalnych narzędzi analizy. Jedną z metod rozpoznawania tego typu efektów jest analiza czasowo-częstotliwościowa kształtu udarowych napięć probierczych [15]. W przypadku modelowania takich przebiegów wymagane jest stosowanie rozbudowanych schematów zastępczych z elementami o wartościach zależnych czasowo i uwzględniających rzeczywiste właściwości dielektryczne materiałów i układów izolacyjnych.

Literatura

- [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*. Kraków, UWND AGH 2003
- [5] Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*. PWN 2005
- [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] Hällström J. i in.: *Applicability of different implementations of K-factor filtering schemes for the revision of IEC60060-1 and -2*. Proc. of the 14th ISH, paper B-32, Beijing, China, 2005
- [8] Garnacho F., Gockenbach E., Hausschild W., Schon K.: *Evaluation procedures for lightning impulse parameters in case of waveforms with oscillation and/or overshoot*. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, No. 2, 1997
- [9] IEC Publication 61083-2 International Standard: *Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Test. Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms*. 1996
- [10] Janik R., Janiszewski P.: *Projekt stanowiska do pomiaru i analizy udarów napięciowych piorunowych*. Zakład Elektroenergetyki, Wydział EAIiE, AGH 1999 (praca magisterska)
- [11] Zydroń P., Janiszewski P.: *Nmeryczne wyznaczanie parametrów udarów piorunowych*. Materiały V Ogólnopolskiego Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2000, Poznań, 2000, 445–450
- [12] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J.: *High voltage engineering – Fundamentals*. 2nd ed., Newness Press, 2000
- [13] Babikow M.A., Komarow N.S., Siergiejew A.S.: *Technika wysokich napięć*. Warszawa, WNT 1967
- [14] *Alternative Transient Program Rule Book* – Electronic Edition in PDF format, www.eeug.org (09.01.2006.)
- [15] Zydroń P.: *Przekształcenie falkowe w pomiarach wysokonapięciowych*. Zeszyt Specjalny Przeglądu Elektrotechnicznego, rok LXXVIII, 2002, 319–322

Wpłynęło: 30.04.2007



Paweł ZYDRÓN

Absolwent Wydziału EAIe AGH w 1987 roku, w specjalności aparatura elektroniczna. Po ukończeniu studiów był projektantem mikroprocesorowych systemów pomiarowych w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie oraz firmach prywatnych. Od 1997 roku pracownik Katedry Elektroenergetyki AGH; w 2001 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Autor lub współautor ok. 60 publikacji, w tym trzech książek i monografii. Obszary zainteresowań: diagnostyka układów izolacyjnych wysokiego napięcia i pomiary wysokonapięciowe z zastosowaniem metod DSP.

e-mail: pawel.zydron@agh.edu.pl



Józef ROEHRICH

Absolwent Wydziału EAIe AGH w 2004 roku, w specjalności elektroenergetyka. Po ukończeniu studiów pracował w firmie Whatman International Ltd. w Banbury (U.K.). Od 2005 roku jest pracownikiem Katedry Elektroenergetyki AGH. Jego zainteresowania zawodowe to: technika wysokich napięć, miernictwo wysokonapięciowe. Hobby: krótkofalarstwo i elektronika.

e-mail: jozef.roehrich@agh.edu.pl