

ANALIZA NUMERYCZNA PARAMETRÓW CZASOWYCH I CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH UDARÓW NAPIĘCIOWYCH PEŁNYCH I UCIEŹYCH

Paweł ZYDRON, Maciej KUNIEWSKI, Łukasz FUŚNIK, Michał BONK

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

tel.: +12 6174416, +12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, maciek@agh.edu.pl, lfusnik@agh.edu.pl, bonkm@agh.edu.pl

Streszczenie: Udry napięciowe pełne i ucięte są stosowane podczas wykonywania prób wytrzymałości elektrycznej wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych. Ze względu na swoje parametry czasowo-częstotliwościowe mogą one być również używane podczas badań diagnostycznych bazujących na analizie charakterystyk częstotliwościowych uzwojeń transformatorów energetycznych. W artykule przedstawiono wyniki rejestracji udarów napięciowych piorunowych – pełnych i uciętych, wytwarzanych w warunkach laboratoryjnych. Dla potrzeb ich rejestracji zastosowano komputerowy system pomiarowy o bardzo dużej częstotliwości próbkowania oraz wysokiej rozdzielczości bitowej. Na podstawie wyników rejestracji, przy zastosowaniu specjalizowanego oprogramowania oraz procedur przetwarzania danych, implementowanych w środowisku programowania i analizy danych MATLAB, wyznaczono wybrane parametry czasowe i częstotliwościowe poszczególnych udarów oraz wykonano analizę porównawczą, w aspekcie ich zastosowania dla potrzeb badań szerokopasmowych.

Słowa kluczowe: napięcia udarowe, udary pełne i ucięte, uzwojenia transformatorowe, analiza czasowa i częstotliwościowa.

1. WPROWADZENIE

Układy izolacyjne urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia muszą spełniać odpowiednie wymagania techniczne dotyczące ich wytrzymałości elektrycznej. Podczas ich eksploatacji podlegają one działaniu narażeń napięciowych wytwarzanych przez [1, 2]:

- 1) napięcia przemienne *AC* (*Alternating Current*);
- 2) napięcia udarowe piorunowe *LI* (*Lightning Impulse*);
- 3) napięcia udarowe łączeniowe *SI* (*Switching Impulse*).

Z tego powodu zachodzi konieczność wykonywania prób i badań konstrukcyjnych oraz odbiorczych urządzeń technicznych, które mogą podlegać działaniu takich narażeń. Ich celem jest weryfikacja poprawności konstrukcji danego typu urządzenia lub konkretnego wyrobu poprzez sprawdzenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego napięciami probierczymi o określonych kształtach i wartościach. Napięcia te powinny być właściwie dobrane, dla zachowania wymogów dotyczących koordynacji izolacji, zgodnie z odpowiednimi normami [3]. Dla zapewnienia możliwości porównania wyników prób wykonywanych w różnych laboratoriach, w normach międzynarodowych i krajowych definiowane są znormalizowane (standardowe) kształty i parametry napięć probierczych oraz sposoby ich określania w procedurach pomiarowych. Międzynarodowo uznanymi normami podstawowymi w zakresie pomiarów wysokonapięciowych jest zestaw norm IEC-60060 [4-6].

W sytuacjach, w których stosowane są normy amerykańskie podstawową normą w dziedzinie pomiarów i techniki wysokonapięciowej jest norma IEEE Std. 4 [7]. W zakresie rejestracji i wyznaczania parametrów napięć udarowych należy brać pod uwagę zalecenia dwóch arkuszy normy IEC-61083 [8, 9], które określają wymagania dotyczące zarówno właściwości i parametrów aparatury rejestrującej udary, jak również specjalizowanego oprogramowania, analizującego dane pomiarowe dla określenia wartości parametrów charakterystycznych zarejestrowanych przebiegów udarowych. Normą amerykańską określającą wymagania dla cyfrowych rejestratorów napięć udarowych jest norma IEEE Std. 1122 [10].

W badaniach diagnostycznych *off-line* służących określeniu stanu uzwojeń transformatorów energetycznych z zastosowaniem szerokopasmowej **funkcji przejścia *TF*** (*Transfer Function*) stosuje się obecnie metody bazujące na pomiarach w **dziedzinie częstotliwości**, z sekwencyjnym, wielopunktowym skanowaniem zakresu ich analizowanych częstotliwości *SFRA* (*Sweep Frequency Response Analysis*) lub w **dziedzinie czasu**, z zastosowaniem niskonapięciowego pobudzenia impulsowego o szerokim widmie *LVI* (*Low Voltage Impulse*) [11-14]. W tym drugim przypadku szerokopasmowa funkcja przejścia jest wyznaczana na podstawie rejestrowanych cyfrowo przebiegów napięć i prądów, przy zastosowaniu dyskretnego przekształcenia Fouriera. W większości przypadków, górna częstotliwość graniczna stosowana w tego typu badaniach nie przekracza wartości 2 MHz [15]. Równolegle, od wielu już lat prowadzone są prace zmierzające do praktycznego zastosowania metody *TF* w badaniach diagnostycznych uzwojeń transformatorów prowadzonych w warunkach pracy transformatora, tzn. *on-line*. Jest to spowodowane rosnącymi wymaganiami odnośnie zapewnienia ciągłej, niezawodnej pracy tych urządzeń oraz nowymi możliwościami realizacji zdalnej kontroli, zgodnie z koncepcją sieci inteligentnych *Smart Grids*. Najbardziej oczywistym rozwiązaniem tego problemu wydaje się zastosowanie w tym celu metody bazującej na analizie przebiegów czasowych napięć i prądów rejestrowanych w stanach przejściowych, podczas naturalnie występujących w sieciach elektroenergetycznych przewodzonych zaburzeń impulsowych, związanych z pojawiającymi się przepięciami szybkozmiennymi [16-18]. Proponowane są również rozwiązania realizujące w warunkach *on-line* wstrzykiwanie impulsów napięciowych lub sygnałów metody *SFRA* z zewnętrznego generatora, np. poprzez pojemność przepustu transformatora [19, 20].

W artykule opisano badania eksperymentalne, przeprowadzone w stanowisku probierczym wyposażonym w generator napięć udarowych wytwarzający przebiegi udarowe o wartości maksymalnej napięcia do 400 kV, zainstalowany w Laboratorium Nowych Technologii w Elektroenergetyce (LNTE), współfinansowanym przez Katedrę Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH oraz Centrum Badawcze ABB w Krakowie. Badania te miały na celu usystematyzowane określenie parametrów szerokopasmowych widm udarów napięciowych piorunowych – pełnych i uciętych, ze względu na ich zastosowanie w badaniach diagnostycznych funkcji przejścia uzwojeń transformatorów.

Przedstawiono wybrane wyniki rejestracji numerycznych przebiegów napięciowych z serii prób udarowych oraz wykonane na ich podstawie analizy częstotliwościowe z zastosowaniem dyskretnej transformaty Fouriera, implementowanej w środowisku numerycznego przetwarzania i analizy danych MATLAB.

2. PODSTAWOWE PARAMETRY UDARÓW NAPIĘCIOWYCH

Kształt udaru piorunowego pełnego (rys. 1) może być opisany matematycznie krzywą dwuwykładniczą:

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

gdzie: A_0 – wartość referencyjna; α , β – stałe tłumienia, przy czym dla udaru piorunowego znormalizowanego, to znaczący 1,2 μs / 50 μs [4] parametry te wynoszą [21]:

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

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

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

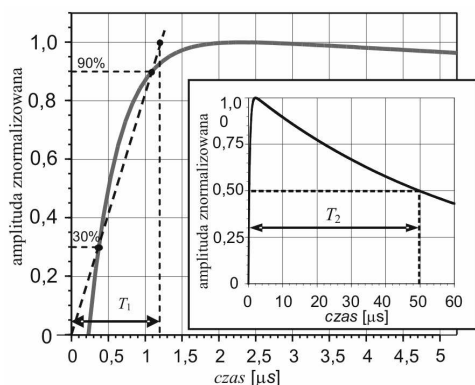
Widmo tego udaru wyrażone jest wzorem [22]:

$$U(\omega) = \frac{A_0(\beta - \alpha)}{(\alpha + j\omega) \cdot (\beta + j\omega)} = \frac{A_0(\beta - \alpha)}{\alpha\beta + j\omega \cdot (\alpha + \beta) - \omega^2} \quad (2)$$

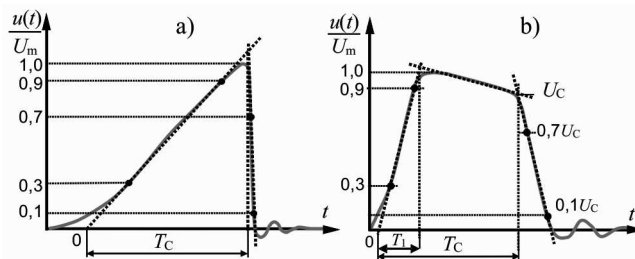
z czego wynika, że charakteryzuje się on niską wartością częstotliwości granicznej, wynoszącą ok. 4 kHz.

Udary ucięte (rys. 2) stanowią tylko część udaru pełnego, a dodatkowo są one zniekształcane na skutek dynamicznych stanów przejściowych, związanych z procesem ucięcia. Może to skutkować pojawieniem się oscylacji, niekiedy znacznych, bezpośrednio po ucięciu. Widmo takiego udaru jest zwykle wielokrotnie szersze od widma udaru pełnego i nie można opisać go w sposób analityczny, a jedynie wyznaczyć poprzez numeryczną analizę fourierowską.

Dla wszystkich analizowanych dla potrzeb opisanych badań udarów napięciowych wyznaczono ich parametry, zgodnie z zasadami określonymi w normie [4] oraz z zachowaniem wymogów norm [5, 6].



Rys. 1. Znormalizowany udar piorunowy 1,2/50 – kształt i definicje czasów T_1 (czas czoła udaru) i T_2 (czas do półszczytu)



Rys. 2. Udary napięciowe ucięte: a) udar ucięty na czole (udar skośny), b) udar ucięty na grzbiecie (T_1 - czas czoła, T_c - czas do ucięcia udaru)

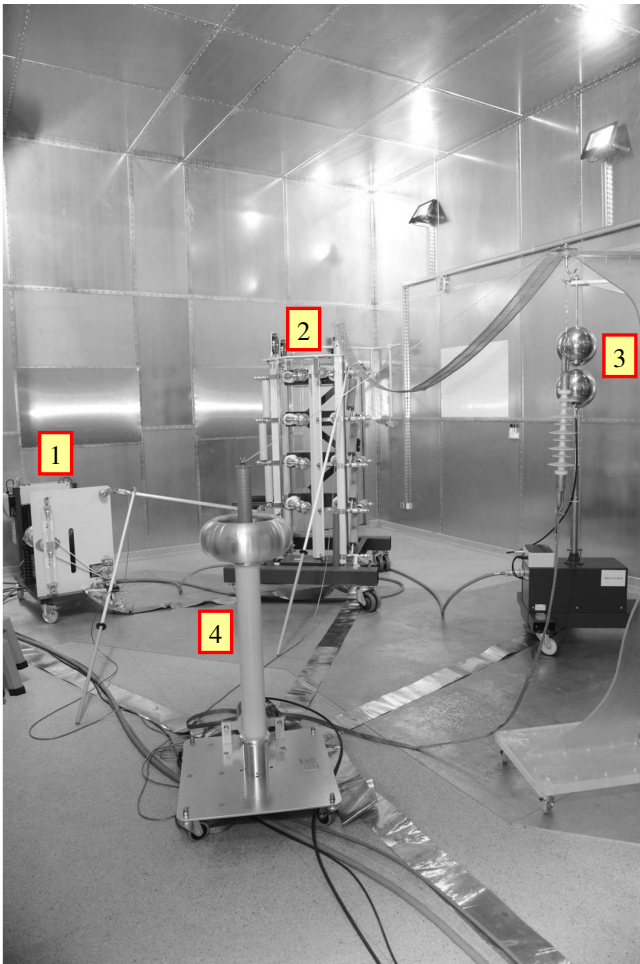
3. WYTWARZANIE I REJESTRACJA NAPIĘĆ UDAROWYCH PIORUNOWYCH PODCZAS EKSPERYMENTÓW LABORATORYJNYCH

Przebiegi napięciowe udarowe, stanowią pewną charakterystyczną grupę napięć probierczych (sygnałów testowych) stosowanych w badaniach układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych. Celem ich wytworzenia jest uzyskanie w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych krótkotrwałych, impulsowych przebiegów napięciowych o określonym kształcie, wartości maksymalnej i biegunowości. Norma przedmiotowa [4] dopuszcza przy tym równoczesną obecność składowych przejściowych o charakterze oscylacyjnym lub aperiodycznym, przy określonym ich dopuszczalnym poziomie. Dla uzyskania wymaganych podczas prób wartości napięć probierczych, stosowane są generatory wielostopniowe, oparte na topologii generatora Marxa [1, 2]. Zdjęcie na rysunku 3 przedstawia widok ogólny oraz konfigurację układową poszczególnych elementów składowych stanowiska badawczego generatora Haefely SGSA 400 kV / 20 kJ, stosowanego podczas wykonanych badań. Głównym elementem tego zestawu jest 4-stopniowy generator napięć udarowych. Zastosowane w jego konstrukcji rozwiązania pozwalają na minimalizację indukcji własnej generatora, co znacząco ogranicza powstawanie niepożądanych oscylacji napięcia podczas wytwarzania udarów uciętych.

System sterowania generatora umożliwia programowanie wartości maksymalnej napięcia U_m znormalizowanego udaru pełnego 1,2/50 oraz czasu do ucięcia T_c . Ten drugi parametr jest kontrolowany za pomocą sterowanego z dużą dokładnością zewnętrznego, 3-elektrodowego iskiernika ucinającego z dodatkowym obwodem inicjującym rozwój wyładowania pomiędzy kulami iskiernika.

Stanowiący element wyposażenia stanowiska badawczego system rejestracji napięć udarowych firmy Haefely jest wyposażony we wzorcowany dzielnik szerokopasmowy oraz układ akwizycji przebiegów z 12-bitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym pracującym z maksymalną częstotliwością próbkowania wynoszącą 120 MHz.

Elementy stanowiska generatora napięć udarowych (rys. 3) są umieszczone w elektromagnetycznie ekranowanej wielokomorowej komorze pomiarowej (klatce Faraday'a), wyposażonej w dedykowany, niezależny od instalacji uziemieniowej pozostałej części budynku uziom pionowy, pogrążony w gruncie na głębokość 28 m, izolowany od gruntu w górnej jego części. Ponieważ system uziomowy na terenie kampusu AGH stanowi uziom rozległy, dlatego dla uziomu komory wyznaczono zarówno rezystancję statyczną (0,44 Ω), jak i udarową (18 Ω dla udaru o $T_1 = 1 \mu\text{s}$). Urządzenia pracujące w komorze są zasilone poprzez 3-fazowy transformator separujący połączony linią kablową bezpośrednio z transformatorem dystrybucyjnym SN/nn.



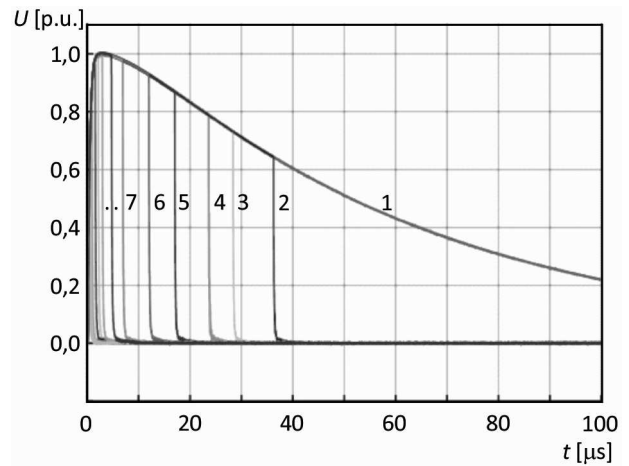
Rys. 3. Stanowisko generatora napięć udarowych Haefely SGSA 400 kV/20 kJ w ekranowanej klatce Faraday'a: 1) układ ładowania; 2) 4-stopniowy generator Marx'a; 3) sterowany iskiernik kulowy ucinający udary, 4) szerokopasmowy dzielnik napięcia

4. WYNIKI REJESTRACJI UDARÓW ORAZ ANALIZ CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH

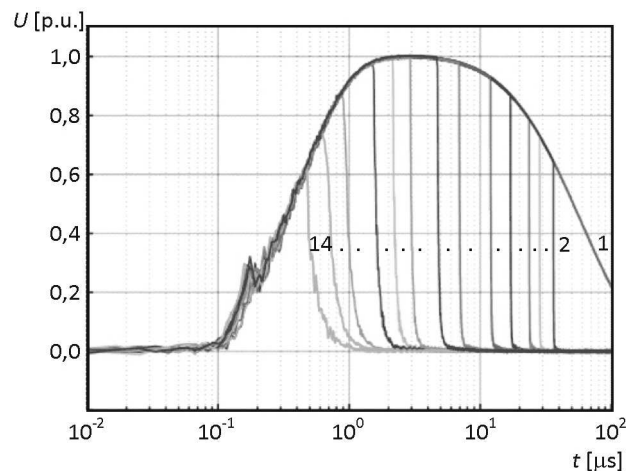
W procedurze pomiarowej realizowanej podczas opisanych badań wygenerowano serię udarów napięciowych piorunowych o zaplanowanych parametrach. Pozwoliło to na rejestrację ok. 50 udarów uciętych o różnych czasach do ucięcia T_C , programowanych w szerokim zakresie, od krótkich udarów uciętych na czole, do długich udarów uciętych na grzbiecie. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przebiegi czasowe wybranych 14 udarów (Tabela 1) – na liniowej i logarytmicznej podstawie czasu. Dla wszystkich rejestrowanych udarów zastosowano bufor danych o stałej długości. Po rejestracjach, dane pomiarowe zostały użyte do numerycznego wyznaczenia widm częstotliwościowych udarów w programie MATLAB. Na rysunku 6 przedstawiono znormalizowane względem składowej stałej widma przebiegów napięć udarowych z rysunków 4 i 5.

Tabela 1. Zestawienie czasów T_C dla udarów z rysunków 4 do 6

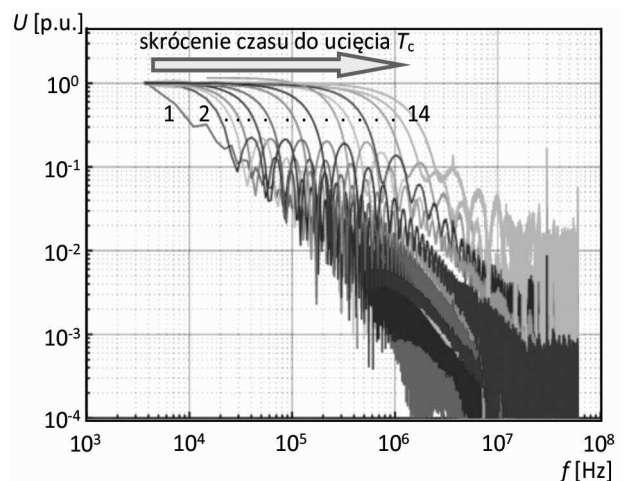
Nr udaru	1	2	3	4	5	6	7
Czas T_C [μs]	udar pełny	36	28	23	17	12	6,9
Nr udaru	8	9	10	11	12	13	14
Czas T_C [μs]	4,8	3,1	2,2	1,5	0,9	0,6	0,4



Rys. 4. Znormalizowane napięciowo udary piorunowe: pełny 1,2/50 (1) i ucięte (2 do 14), zarejestrowane podczas badań – przedstawione na liniowej podstawie czasu



Rys. 5. Znormalizowane napięciowo udary piorunowe: pełny 1,2/50 (1) i ucięte (2 do 14), zarejestrowane podczas badań – przedstawione na logarytmicznej podstawie czasu



Rys. 6. Wynik analizy widma rejestrowanych udarów piorunowych

Analiza wyznaczonych widm przebiegów udarowych wskazuje na to, że ich częstotliwości graniczne zmieniają się w zakresie od ok. 5 kHz dla analizowanego udaru piorunowego pełnego, do ok. 1 MHz dla udaru uciętego z czasem do ucięcia T_C wynoszącym ok. 0,4 μs. Daje to podstawę dla określenia wymagań dotyczących parametrów czasowych przebiegów impulsowych, które mogą być użyteczne podczas badań diagnostycznych *on-line* uzwojeń transformatorów energetycznych.

5. PODSUMOWANIE

Efektywna i wiarygodna diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych jest jednym z głównych elementów zapewnienia ich niezawodnej pracy. Z tego względu dąży się do uzyskania możliwości gromadzenia danych diagnostycznych podczas pracy urządzeń – *on-line*. Dla zastosowania metody *TF* w badaniach tego typu konieczne jest pobudzenie uzwojeń transformatorów sygnałami szerokopasmowymi, o częstotliwościach granicznych wystarczających dla analizy diagnostycznej charakterystyk funkcji przejścia. Obecnie dostępne na rynku komercyjne przyrządy do analizy *TF* z zastosowaniem metody *SFRA* posiadają górną częstotliwość graniczną od 1 MHz do 2 MHz [18]. Aby zakres częstotliwości analizowanych podczas pomiarów *on-line*, bazujących na pojawiających się w sieciach zaburzeniach impulsowych, był adekwatny do tych wartości zaburzenia te winny posiadać parametry odpowiadające udarom uciętym z czasami do ucięcia T_C poniżej 0,4 μ s. W przypadku dłuższych czasów składowe powyżej 1 MHz będą znajdowały się na opadającej części charakterystyki częstotliwościowej. Nie eliminuje to całkowicie możliwości ich analizowania, jednak prowadzi do zwiększenia niepewności pomiarowej i konieczności stosowania przetworników *A/C* o większej rozdzielczości bitowej. Zbliżone wartości amplitud poszczególnych składowych widma w zakresie do 2 MHz wystąpią dopiero dla impulsów o czasach T_C wynoszących ok. 0,2 μ s.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B., Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, Wyd. AGH, Kraków, 2016
2. Flisowski Z., Technika wysokich napięć, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 2017
3. PN-EN 60071-1:2008, Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły
4. PN-EN 60060-1:2011, Wysokonapięciowa technika probiercza - Ogólne definicje i wymagania probiercze
5. PN-EN 60060-2:2011, Wysokonapięciowa technika probiercza - Układy pomiarowe
6. PN-EN 60060-3:2008, Wysokonapięciowa technika probiercza - Definicje i wymagania dotyczące prób w miejscu zainstalowania
7. IEEE Std 4-2013, IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques
8. PN-EN 61083-1:2002, Przyrządy i oprogramowanie stosowane do pomiarów w wysokonapięciowych próbach udarowych - Wymagania dotyczące przyrządów
9. PN-EN 61083-2:2013-07, Przyrządy i oprogramowanie używane do pomiarów w próbach wysokonapięciowych

- i silnoprądowych - Wymagania dla oprogramowania do prób z udarami napięciowymi i prądowymi
10. IEEE Std. 1122-1998 - IEEE Standard for digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests
11. Malewski R., Poulin B., Impulse testing of power transformers using the transfer function method, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 3, pp. 476-489, 1988
12. Florkowski M., Furgał J., Transformer winding defects identification based on a high frequency method, Meas. Sci. Technol., vol. 18, pp. 2827-2835, 2007
13. Gomez-Luna E., Mayor G. A., Gonzalez-Garcia C., Guerra J. P., Current status and future trends in Frequency-Response Analysis with a transformer in service, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 28, no. 2, pp. 1024-1031, 2013
14. Yong Liu et al., A study of the sweep frequency impedance method and its application in the detection of internal winding short circuit faults in power transformers, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, pp. 2046-2056, 2015
15. IEC 60076-18, Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response
16. Leibfried T., Feser K., On-line monitoring of transformers by means of the transfer function method, Conference Record of the 1994 IEEE Intern. Symp. on Electrical Insulation, pp. 111-114
17. Setayeshmehr A., Borsi H., Gockenbach E., Fofana I., On-line monitoring of transformer via transfer function, 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, pp. 278-282
18. Bagheri M., Salay Naderi M., Blackburn T., Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 6, pp. 1860-1870, 2012
19. Yao C., Zhao Z., Chen Y., Zhao X., Li Z., Wang Y., Zhou Z., Wei G., Transformer winding deformation diagnostic system using online high frequency signal injection by capacitive coupling, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 4, pp. 1486-1492, 2014
20. Rahimpour H., Mitchell S., Tusek J., The application of sweep frequency response analysis for the online monitoring of power transformers, 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, 2016
21. 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. of the 11th ISH, paper 1.74.S21, IEC Publ. No. 467, London, 1999
22. Keiser K., Electromagnetic Compatibility Handbook, CRC Press, 2005

NUMERICAL ANALYSIS OF THE TIME AND THE FREQUENCY PARAMETERS OF FULL AND CHOPPED LIGHTNING IMPULSES

Full and chopped lightning voltage impulses are used to perform withstand voltage tests of HV electrical insulating systems. Due to their time-frequency parameters, they can also be used during diagnostic tests based on the analysis of frequency characteristics of power transformer windings. The article presents the results of acquisition of full and chopped lightning impulses, generated in laboratory conditions. For their registration, a computerized measurement system with very high sampling frequency and high bit resolution was used. With the application of specialized software and data processing procedures implemented in the MATLAB programming and data analysis environment, the selected time and frequency parameters of the individual impulses were determined, and comparative analysis was made in the aspect of their application for wideband research purposes.

Keywords: full and chopped lightning impulses, transformer windings, time and frequency analysis.