Jerzy WODZIŃSKI
POLITECHNIKA ŁÓDZKA
INSTYTUT ENERGOELEKTRYKI

Właściwości dzielników pojemnościowych słabo tłumionych przy pomiarach napięć piorunowych pełnych i uciętych na grzbiecie

Prof. dr hab. inż. Jerzy Wodziński
pracownik Zakładu Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Zaiteresowania naukowe: technika prób i pomiarów wysokonapięciowych, diagnostyka i wytrzymałość izolacji urządzeń elektrycznych w eksploatacji.

Streszczenie

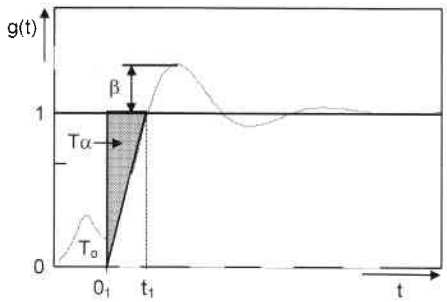
W artykule przeanalizowano wpływ parametrów dzielnika pojemnościowego słabo tłumionego na niepewności związane z odtworzeniem parametrów czasowych udarów pełnych i uciętych na grzbiecie. Podano także wykresy zależności pomiędzy tłumieniem w obwodzie dzielnika a względnym czasem jego odpowiedzi, przy którym maksymalna niepewność pomiaru czasu trwania czoła nie przekroczy 5 i 8 %.

Abstract

Effects of parameters of low damped capacitive dividers on uncertainties in reproduction of time parameters of full and on – tail chopped impulses were analysed in the paper. Plots of damping in the divider circuit versus its relative response time were given in case the maximum untercetainty of front time does not exceed 5 and 8%.

Wprowadzenie

Dzielniki pojemnościowe słabo tłumione wprowadzone do praktyki laboratoryjnej przez W. Zaengla [6] stosowane były w układach do pomiaru bardzo wysokich napięć piorunowych na ogół wyższych od 1500 ÷ 2000 kV. W tym zakresie bowiem uzyskanie wymaganych parametrów w dzielnikach rezystancyjnych napotykało na znaczne trudności. Obecnie dzielniki pojemnościowe słabo tłumione są coraz częściej stosowane i przy napięciach niższych. Mają wiele zalet w stosunku do dzielników rezystancyjnych:



Rys. 1. Odpowiedź dzielnika pojemnościowego słabo tłumionego na jednostkowy skok napięcia. T_α – cząstkowy czas odpowiedzi, β – przepięcie, 0_1 – umowny początek odpowiedzi, T_0 – początkowe zniekształcenie odpowiedzi

- nie wpływają na długość grzbietu udaru piorunowego otrzymywanego z generatora;
- nie ma problemu z nadmiernym wydzielaniem się energii generatora w gałęzi wysokonapięciowej;
- wpływ stosunkowo niewielkiej pojemności dzielnika na czas trwania czoła dość łatwo skorygować.

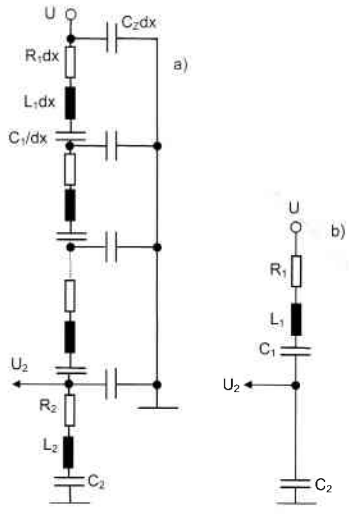
Dzielnik pojemnościowy słabo tłumiony różni się od stosowanego do pomiaru wysokich napięć przemiennych wprowadzonymi do gałęzi wysokonapięciowej szeregowymi opornikami, których celem jest wytłumienie przepięcia w jego odpowiedzi do oczekiwanej wartości.

Odpowiedź dzielnika pojemnościowego słabo tłumionego

Typową jest odpowiedź oscylacyjna, której przykład podano na rys. 1. Jest to efekt działania indukcyjności wysokonapięciowej gałęzi dzielnika L1 (p. rys. 2), której wartość można ocenić na 0,6 μH/m, uzupełnioną szczątkowymi indukcyjnościami kondensatorów C_1 i oporników tłumiących. Zniekształcenie części początkowej odpowiedzi powstaje w wyniku występujących w dzielniku przebiegów falowych i indukcyjności niskonapięciowej gałęzi L_2 [4]. Zmniejszenie go wymaga maksymalnego ograniczenia tej indukcyjności. Pojemności doziemne C_z wysokonapięciowej gałęzi dzielnika, których wartość można szacować na 15 pF/m, wpływają na jego przekładnię (rys. 2) [5]

$$\vartheta = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \frac{\sin h\left(\frac{C_z}{C_1}\right)}{\sqrt{\frac{C_z}{C_1}}} \qquad (1)$$

natomiast dla wartości stosunku $\frac{C_z}{C_1} \le 0.5$ tylko w nieznacznym



*Rys. 2. Schematy zastępcze dzielnika pojemnościowego słabo tłumionego: **a)** ogólny, **b)** uproszczony*

stopniu na cząstkowy czas odpowiedzi Tα i pozostałe parametry dzielnika ważne z punktu widzenia jego właściwości metrologicznych. Oporność R_2 z reguły nie jest obecnie stosowana. Pogarsza bowiem odtworzenia udaru piorunowego [2,3]. Z tego względu do analizy właściwości metrologicznych dzielnika można przyjąć uproszczony schemat dzielnika podany na rys. 2b.

Odpowiedź dzielnika na jednostkowy skok napięcia może być przedstawiona w postaci

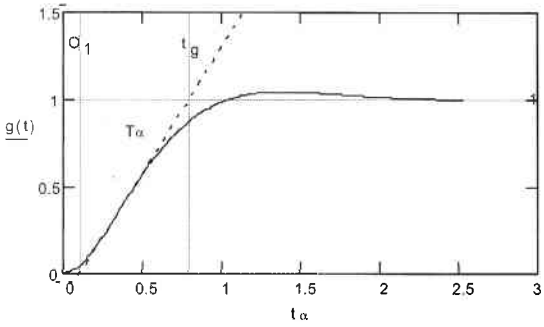
$$g(t) = 1 - \exp(-\delta t)\frac{\sin(\Omega t + \sigma)}{\sin(\sigma)} \qquad (2)$$

gdzie:

$$K_d = \frac{4L_1}{R_1^2 C_1} \quad a = R_1 C_1 \quad \delta = \frac{2}{K_d a} \quad \Omega = \delta\sqrt{K_d - 1} \quad \sigma = \operatorname{atan}\left[\frac{\Omega}{\delta}\right]$$

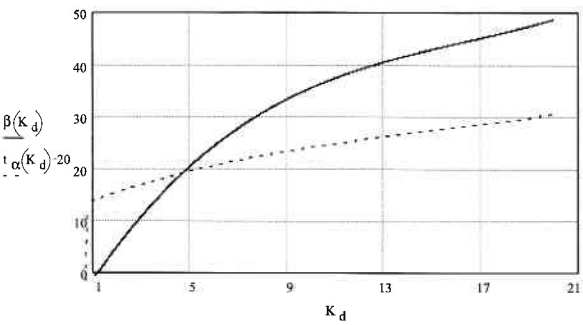
(parametr K_d jest związany z tłumieniem w obwodzie dzielnika, $K_d > 1$ dla przebiegów oscylacyjnych). Przepięcie odpowiedzi można określić ze wzoru

$$\beta = \exp\left(-\frac{\pi}{\sqrt{K_d - 1}}\right) \qquad (3)$$



Rys. 3. Wyznaczanie cząstkowego czasu odpowiedzi dzielnika wg IEC [1]

Zgodnie z dokumentem IEC [1] cząstkowy czas odpowiedzi wyznacza się prowadząc styczną do najbardziej stromej części narastania odpowiedzi. Punkt przecięcia stycznej z osią odciętych wyznacza umowny początek odpowiedzi 0_1. Wartość cząstkowego czasu odpowiedzi T_α jest równa polu trójkąta wyznaczonego przez punkty 0_1 i punkty przecięcia z poziomą o rzędnej g(t) = 1 stycznej i prostopadłej poprowadzonej z 0_1. Na rys. 4. podane zostały wykresy zależności przepięcia β i względnego cząstkowego czasu odpowiedzi $t_\alpha = T_\alpha / R_1C_1$ od K_d.



Rys. 4. Wykresy zależności przepięcia β i względnego cząstkowego czasu odpowiedzi t_α od parametru K_d

Odtwarzanie czoła udaru piorunowego przez dzielnik

Niepewność odtworzenia czasu trwania czoła rejestrowanego udaru zależy nie tylko od parametrów dzielnika ale także od parametrów głównego obwodu rozładowania generatora, w którym udar został wytworzony [5]. Zwykle te parametry nie są zbyt dokładnie znane a także zmieniają się wraz ze zmianą badanego obiektu. Z tego względu przy rozważaniu niepewności pomiaru kształtu czoła należy przyjąć najmniej korzystny wariant, przy którym niepewność jest największa. Zachodzi to dla udaru o kształcie dwuwykładniczym określonym wyrażeniem

$$u(t) = c\left(\exp(-mt) - \exp(-bt)\right) \qquad (4)$$

Dla udaru o kształcie 1,2/50 m = 68,5 1/μs, b = 0,405 1/μs, c = 1,036.

Odpowiedź dzielnika na jednostkowe wymuszenie o takim kształcie ma postać

$$g(t) = c\left[W_1(t) + W_2(t) + W_3(t) + W_4(t)\right] \qquad (5)$$

przy czym:

$$W_1(t) = \frac{A_1}{b}\left[1 - \exp(-bt)\right] \qquad W_2(t) = \frac{A_2}{m}\left[1 - \exp(-mt)\right]$$

$$W_3 = \frac{-A_3}{\omega^2}\left[1 - \exp(-dt)\frac{\sin(\Omega t + \sigma}{\sin(\sigma)}\right] \qquad W_4 = -\frac{A_4}{\Omega}\exp(-dt)\sin(\Omega t)$$

$$M_1 = b^2 - 2bd + \omega^2 \quad M_2 = 2md - m^2 - \omega^2$$

$$A_1 = b\frac{\omega^2}{M_1} \quad A_2 = m\frac{\omega^2}{M_2} \quad A_3 = \frac{2md - m^2 + b^2 - 2bd}{M_1 M_2}\omega^4$$

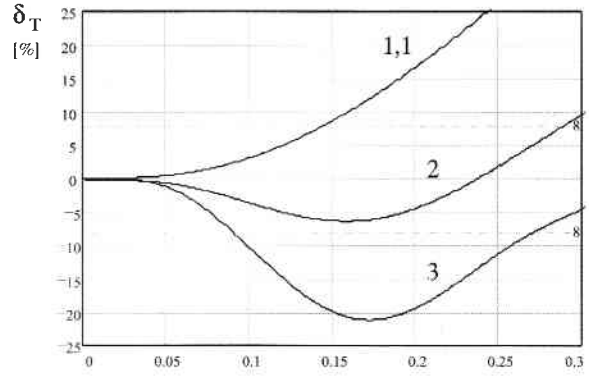
$$A_4 = \frac{b^2 m + m\omega^2 - bm^2 - b\omega^2}{M_1 M_2}\omega^2$$

Pozostałe oznaczenia jak wyżej. Przykłady niepewności pomiaru czasu trwania czoła odtwarzanego przez dzielnik podano na rys. 5. Niepewność tą oznaczono

$$\delta_T = \frac{T_1^* - T_1}{T_1} 100\% \qquad (6)$$

T_1^* – jest czasem trwania czoła odtworzonego udaru
T_1 – czasem trwania czoła oryginału.

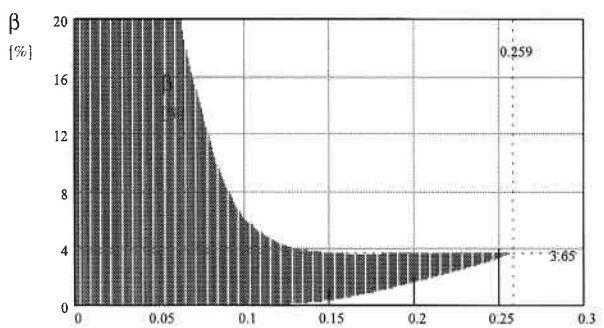
Na rysunku 5 pokazano przykłady zależności niepewności odtworzenia czasu trwania czoła udaru od „względnego czasu odpowiedzi" $x = \frac{T_\alpha}{T_1}$ i parametru związanego z tłumieniem dzielnika K_d [4].



Rys. 5. Przykłady zależności niepewności odtworzenia czasu trwania czoła udaru δ_T w % od względnego czasu odpowiedzi x i parametru K_d. Na rysunku zaznaczono niepewności odpowiadające –8 i 8 %

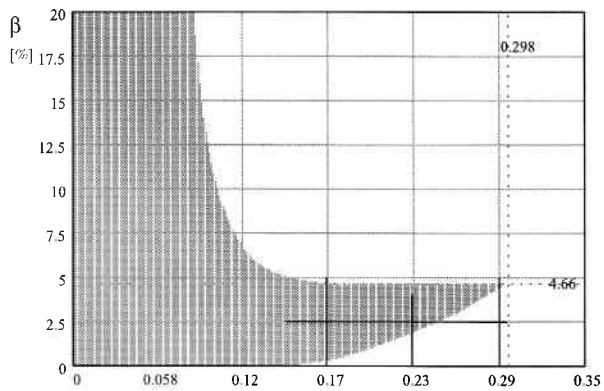
Jak widać z przytoczonych krzywych odtworzone czoło udaru może mieć większą stromość niż oryginał. Przykład wyznaczenia wartości „względnego czasu odpowiedzi" x odpowiadającego niepewności odtworzenia czasu trwania czoła udaru piorunowego 8% podano na rys. 5. Jako dopuszczalną należy przyjąć jego najmniejszą wartość. Wprawdzie z rysunku 5 widać, że istnieje jeszcze druga strefa wartości x, w której niepewność zawarta jest w przedziale ±8% (np. dla K_d = 3). Jednak praktycznie nie da się tej strefy wykorzystać ze względu nie tylko na trudności w jej dokładnym określeniu ale przede wszystkim dlatego, że dla tak dużych wartości „względnego czasu odpowiedzi" następuje znaczne odkształcenie udaru przez dzielnik (pkt. 4)

Na rysunkach 6 i 7 podano obszary dopuszczalnych najmniejszych „względnych czasów odpowiedzi" dla dwóch wybranych niepewności odtworzenia czasu trwania czoła udaru piorunowego. Na osi rzędnych, za standardem IEC [1], podano wartość przepięcia odpowiedzi β. Jest ona związana z wartością parametru reprezentującego tłumienie w obwodzie dzielnika K_d wzorem (3). Jest to praktyczny sposób, bowiem wartość przepięcia łatwo jest określić z wyznaczonej doświadczalnie odpowiedzi dzielnika a stąd ocenić wnoszoną przez dzielnik niepewność pomiaru czasu trwania czoła odtwarzanego udaru. Obszary, w których niepewności pomiaru nie przekraczają 5 i 8% zostały zaciemnione.



Rys. 6. Wykres zależności β = F(x) odpowiadający niepewności odtworzenia czasu trwania czoła udaru 5 %

Występujące na wykresach podanych na rysunkach 6 i 7 extrema odpowiadają przypadkom, gdy minimum funkcji $\delta_T = f(K_d)$ (p. rys. 5) leży nieco wyżej od przyjętej granicznej wartości niepewności. W takim bowiem przypadku ma ona znak dodatni.

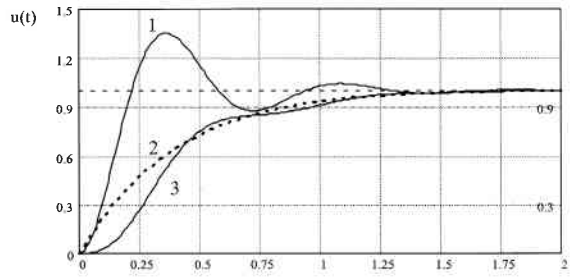


Rys. 7. Wykres zależności β = F(x) odpowiadający niepewności pomiaru czasu trwania czoła udaru piorunowego nie przekraczającej 8%

Jeśli parametry dzielnika spełniają warunek wymaganej dokładności odtworzenia czasu trwania czoła, niepewność związana z pomiarem wartości szczytowej nie przekracza 1%.

Wpływ tłumienia w obwodzie dzielnika na odkształcenie czoła odtwarzanego udaru

W standardzie IEC 60 -2 [1] przyjęto, że dla dowolnie małego tłumienia w obwodzie dzielnika istnieje wartość względnego czasu odpowiedzi, $x = \frac{T_\alpha}{T_1}$ przy której akceptowana jest niepewność odtworzenia czasu trwania czoła udaru piorunowego.



Rys. 8. Przykład wpływu tłumienia w obwodzie dzielnika (β = 35%, co odpowiada K_d = 10) na kształt czoła odtwarzanego udaru. 1 – odpowiedź dzielnika, 2 – oryginał, 3 – odtworzony udar. x = 0.069

Wydaje się jednak, że autorzy potraktowali to zagadnienie zbyt formalnie. Wymaganie może być spełnione, ale staje się to w wyniku większego lub mniejszego odkształcenia czoła udaru. Odtworzone czoło udaru może znacznie różnić się od oryginału. Przykład podano na rysunku 8. Podobne lub większe zniekształcenia występują przy jeszcze mniejszych tłumieniach. Wydaje się więc, że nie należy stosować do pomiarów udarów piorunowych dzielników pojemnościowych słabo tłumionych, w których przepięcie przekracza 20% ($K_d \cong 5$) niezależnie od przyjętej granicznej niepewności odtworzenia czasu trwania czoła udaru piorunowego.

Czas ustalenia odpowiedzi

Zgodnie ze standardem IEC [1] za czas ustalenia odpowiedzi przyjmuje się najkrótszy czas t_s, dla którego zachodzi związek

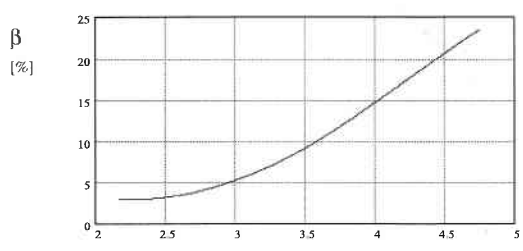
$$|T_N - T(t)| < 0.02\,t_s$$

gdzie:

$$T(t) = \int_{0_1}^{t} [1 - g(\tau)]d\tau$$

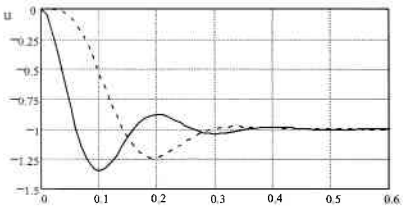
$$T_N \cong T(t_{max})$$

t_{max} – górna granica znamionowego przedziału czasu dla rozpatrywanego układu pomiarowego.



Rys. 9. Wzajemna zależność pomiędzy przepięciem odpowiedzi dzielnika β i czasem jej wytłumienia t_S

Na rys. 9 pokazana została zależność pomiędzy czasem wytłumienia odpowiedzi a przepięciem odpowiedzi. Czas wytłumie-

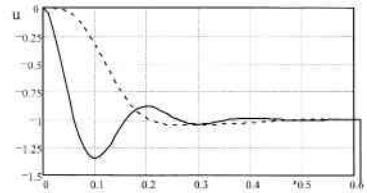


nia odpowiedzi ma szczególne znaczenie przy pomiarze wartości szczytowych udarów ukośnych bowiem powinien być spełniony warunek czasu do przeskoku $T_C \geq t_S$.

Rys.10. Wpływ względnego czasu odpowiedzi dzielnika x, odpowiadającemu niepewności pomiaru czasu trwania czoła udaru 5%, przy przepięciu $\beta = 11\%$ ($K_d = 3$) na rejestrowany przebieg napięcia występujący po ucięciu (linia przerywana)

Odtworzenie przebiegu napięcia po ucięciu udaru

W pewnych przypadkach badań interesujący jest przebieg napięcia po ucięciu udaru. Ma ono z reguły charakter stosunkowo słabo tłumionych oscylacji o częstotliwości od kilku do kilkunastu MHz, zależnie od parametrów i wymiarów pętli ucięcia. Na ogół pomiar czasu ucięcia i samego przebiegu wymaga dość wyrafinowanych metod i użycia urządzeń o bardzo wysokich parametrach. Jednak zwykle dla prowadzącego pomiary istotna jest orientacyjna wartość pierwszej amplitudy przepięcia jaka wystąpi po przeskoku na badanym obiekcie. Np. norma [7] wymaga aby pierwsza amplituda oscylacji po ucięciu nie była większa od 0,3 wartości napięcia, przy której nastąpiło ucięcie. W innym przypadku należy oscylacje odpowiednio wytłumić. Jak widać z rysunków 10 i 11 można spodziewać się przy pomiarach dość znacznych różnic pomiędzy rzeczywistym przebiegiem napięcia po przeskoku w na badanym obiekcie (lub układzie ucinającym) a otrzymanym obrazem ekranie oscyloskopu lub innego urządzenia pomiarowego. Ocena więc, czy przebieg napięcia spełnia wymagania normy [7] może być utrudniona. Wybór optymalnego z punktu widzenia pomiaru kształtu udaru parametrów dzielnika ($K_d = 2$, $\beta = 4.3\%$) nie daje możliwości oceny przebiegu napięcia po ucięciu (jeśli leży to w zakresie zainteresowań prowadzącego badania). Lepsze znacznie wyniki otrzymuje się w tym przypadku przy mniejszym tłumieniu w obwodzie dzielnika. Trzeba tu jednak dodać, że przy $K_d \geq 4$ ($\beta \geq 16\%$) amplituda odtworzonej oscylacji jest większa od oryginału.



Rys. 11. Dane jak dla rys. 10 tylko przy $\beta = 4,3\%$ ($K_d = 2$). Odpowiedź dzielnika linia przerywana.

Literatura

[1] IEC 60 – 2. Second Edition 1994. High – voltage techniques. Part 2: *Measuring systems*.

[2] **R. Malewski , N. Hylten – Cavallius**: Low – voltage arm for EHV impulse dividers, IEEE Trans. PAS 93, Nr 6, p.1967, 1974 .

[3] **J. Wodziński**: Analiza dokładności odtwarzania udarów piorunowych przez dzielniki rezystancyjne i pojemnościowe. ZN Politechniki Łódzkiej *ELEKTRYKA*, Nr 372. Rozprawy Naukowe z. 30, 1980.

[4] **J. Wodziński**: Przebiegi falowe w dzielnikach pojemnościowych słabo tłumionych. ZN Politechniki Poznańskiej *ELEKTRYKA*, Nr 21, s. 175, 1992.

[5] **J. Wodziński**: Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. Wyd. PWN, Warszawa, 1997.

[6] **W. Zaengl**: Der Stosspannungsteiler mit Zuleitung. Bull. SEV, Bd 61, Nr 21, s.1003, 1979.

[7] PN – 86 / E – 04070 / 13 : Transformatory. Metody badań. Próba wytrzymałości elektrycznej napięciem udarowym piorunowym.

Artykuł recenzowany: 8.10.1998 r.