

WYSOKONAPIĘCIOWY DZIELNIK REZYSTANCYJNY

Jarosław WALCZAK¹, Krzysztof PACHOLSKI², Radosław KOWALCZYK³

1. INSTOM sp. z o.o. Łódź
tel.: 721 292 080 e-mail: jaroslaw.walczak.jw@gmail.com
2. Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
tel.: 604 113 444 e-mail: krzysztof.pacholski@p.lodz.pl
3. ZRE."ZWAR" Łódź
tel.: 696 46 48 29 e-mail: powiernictwoinwestycyjne@gmail.com

Streszczenie: Wysokonapięciowy dzielnik rezystancyjny ma za zadanie obniżyć wartość napięcia do poziomu akceptowanego przez przyrządy pomiarowe. Wraz ze wzrostem napięcia wejściowego i prędkości jego zmian w czasie wzrasta wpływ pojemności na dokładność wskazań dzielnika. Rozwiązaniem jest kompensacja dzielnika. Dzielnik wykonany z elementów o takiej samej impedancji będzie dzielnikiem skompensowanym. W takim przypadku błąd wskazań będzie związany z czasem odpowiedzi dzielnika na sygnał wejściowy. Teoretyczny dzielnik napięcia jest elementem inercyjnym pierwszego rzędu. Należy zaznaczyć, że w rzeczywistych warunkach dzielnik pracuje w pewnym układzie pomiarowym i w praktyce nie można go rozpatrywać samodzielnie. Zastosowanie układów automatyki do regulacji parametrów elementów kompensacyjnych dzielnika może być rozwiązaniem na zmniejszenie błędów pomiarowego.

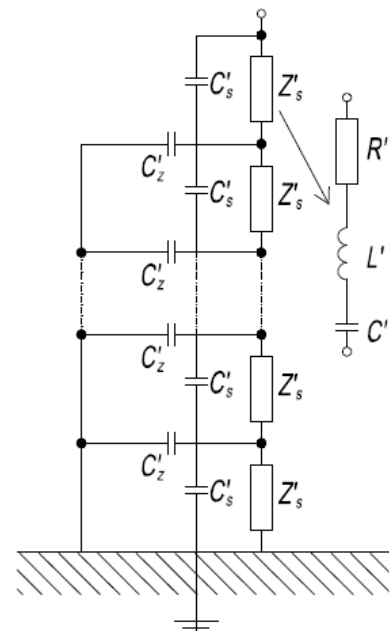
Słowa kluczowe: Dzielnik rezystancyjny. Pojemność doziemna. Transmitancja dzielnika.

1. DZIELNIKI POMIAROWE

Zadaniem napięciowego dzielnika pomiarowego jest obniżenie wartości mierzonego napięcia do wartości napięcia dostosowanej do zakresu przyrządu pomiarowego. Przekładnia dzielnika to iloraz napięcia doprowadzonego do dzielnika do napięcia na jego wyjściu. Teoretycznie przy dzielniku wykonanym z identycznych elementów, o jednakowej impedancji, wyznaczenie przekładni nie stanowi żadnego problemu. W takim przypadku przekładnia zależy tylko od liczby elementów dzielnika. Problem z wyznaczeniem przekładni dzielnika na podstawie jego impedancji wzrasta wraz ze wzrostem wartości napięcia wejściowego U_1 , jak również jego zmian w czasie du/dt . Dla wysokich wartości napięcia i wraz ze wzrostem częstotliwości znaczną rolę zaczynają odgrywać pojemności występujące w układzie dzielnika związane z połączeniami jego elementów, jak i pojemnością występującą pomiędzy elementami dzielnika, a ziemią. Należy również pamiętać o występowaniu indukcyjności elementów i ich połączeń. Rysunek 1 przedstawia schemat zastępczy dzielnika z uwzględnieniem impedancji i pojemności występujących w układzie rzeczywistego dzielnika napięcia.

W technice wysokonapięciowej do pomiarów napięcia wykorzystywane są dzielniki rezystancyjne, pojemnościowe

i rezystancyjno-pojemnościowe. Dzielniki rezystancyjne nadają się do pomiaru napięć stałych, przemiennych i udarowych. Dzielniki pojemnościowe wykorzystywane są do pomiaru napięć udarowych i przemiennych. Wysokość kolumny dzielnika zależy od rodzaju i wartości napięcia wejściowego. Dla napięć przemiennych wysokość kolumny dzielnika to minimum 5 mm/kV wartości skutecznej napięcia. Dla dzielnika na napięcie 400 kV wysokość kolumny dzielnika to ponad $2,5 \text{ m}$, a wraz z konstrukcją i zaciskami to prawie 4 m wysokości. Dla udarów łączeniowych przyjmuje się wysokość kolumny dzielnika 4 mm/kV , dla napięć stałych 3 mm/kV , dla udarów piorunowych około $2,5 \text{ mm/kV}$ wartości napięcia. [1] [2] [6]

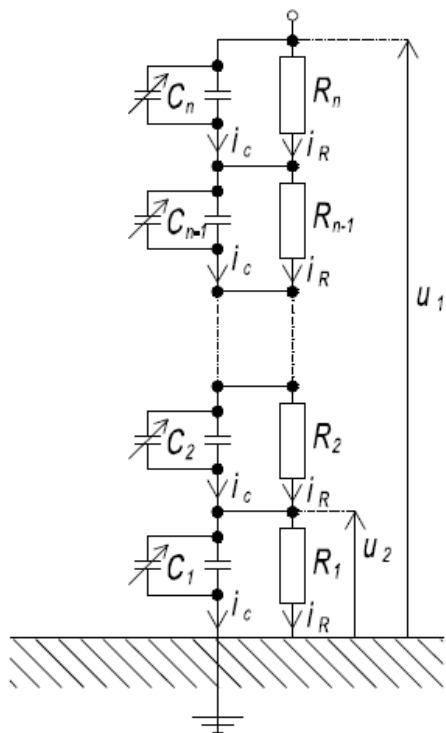


Rys.1. Schemat zastępczy dzielnika uwzględniający impedancję [1]

Na rysunku 1 oznaczono odpowiednio pojemność doziemną poszczególnych członów dzielnika jako C'_z , C'_s to pojemność międzyelementowa elementów dzielnika, a Z'_s to impedancja członu dzielnika o parametrach rezystancji R' , indukcyjności L' i pojemności C' .

2. DZIELNIK REZYSTANCYJNY

W dzielnikach rezystancyjnych można w znacznym stopniu zniwelować wpływ indukcyjności poprzez odpowiednie wykonanie rezystorów składających się na kolumnę dzielnika. Ponadto na dokładność podziału dzielnika indukcyjność ma znacznie mniejszy wpływ niż pojemności. Pojemności międzyelementowe są wielokrotnie mniejsze od pojemności doziemnych. Fakt ten w pewnym uproszczeniu pozwala na pominięcie pojemności międzyelementowych. Znacznie uprościć się wówczas obliczenia związane z wyznaczeniem czasu odpowiedzi dzielnika na sygnał wejściowy. Aby wyeliminować wpływ pojemności w poszczególnych członach dzielnika na jego dokładność podziału napięcia niezależnie od częstotliwości możliwym rozwiązaniem jest skompensowanie dzielnika. Dzielnik wykonany z elementów o takiej samej impedancji będzie dzielnikiem skompensowanym. W takim dzielniku przesunięcia fazowe pomiędzy prądem i napięciem na każdym z członów dzielnika będą identyczne. Uproszczony schemat układu skompensowanego częstotliwościowo dzielnika przedstawia rysunek 2. W tym przypadku dzielnik ma charakter mieszany, rezystancyjno-pojemnościowy.



Rys. 2. Schemat skompensowanego częstotliwościowo dzielnika rezystancyjnego

Pojemności oznaczone na rysunku 2, C_1 do C_n to pojemności poszczególnych członów dzielnika, na schemacie przedstawione jako równoległe połączenie kondensatora stałego, reprezentującego pojemność własną członu dzielnika i kondensatora nastawnego, jako elementu kompensacyjnego. Rezystancje członów dzielnika oznaczono jako R_1 do R_n . Prąd i_c jest prądem płynącym przez pojemności poszczególnych członów dzielnika. Prąd i_R jest prądem płynącym przez rezystancję. W dzielniku skompensowanym, w każdym z członów płyną prądy pojemnościowe i rezystancyjne o takich samych wartościach. Odpowiednio napięcie na wejściu i na wyjściu dzielnika oznaczono jako u_1 i u_2 . Przy założeniu, że przez pojemności będzie płynął taki sam prąd, pojemność poszczególnych członów dzielnika nie wpłynie na jego

dokładność podziału napięcia. Rezystancja w członach dzielnika będzie skompensowana, gdy stałe czasowe tych członów będą sobie równe. Czyli będzie spełniona zależność opisane wzorami (1) (2) (3).

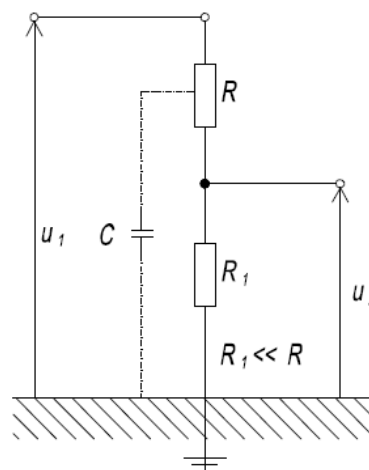
$$\tau_1 = \tau_2 \quad (1)$$

$$\tau_1 = \sum_{k=2}^n R_k \cdot \left(\sum_{k=2}^n \frac{1}{C_k} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\tau_2 = R_1 \cdot C_1 \quad (3)$$

We wzorach (1) (2) (3) oznaczono jako τ_1 stałą czasową $(n-1)$ elementów członu wejściowego i τ_2 stałą czasową członu wyjściowego dzielnika. Dobór odpowiedniej pojemności kondensatorów można wyznaczyć porównując kształt sygnału na wejściu i na wyjściu dzielnika, a w przypadku dzielnika wieloczłonowego na wybranych odpowiednio członach dzielnika. Odpowiednim sygnałem jest tu sygnał prostokątny. W praktyce o kształcie jak najbardziej zbliżonym do kształtu prostokątnego. Warunek równości stałych czasowych będzie spełniony gdy kształty przebiegu sygnałów na wejściu i na wyjściu będą jednakowe lub przynajmniej zbliżone do siebie. [3]

Pojemności doziemne, które nie sposób pominąć w przypadku pomiaru wysokich napięć, wpływają na błąd dzielnika związany z jego czasem odpowiedzi na sygnał wejściowy. Można uprościć układ, nie zmieniając jego czasu odpowiedzi, poprzez dobór odpowiedniej zastępczej pojemności w połowie wysokości dzielnika. Wartość zastępczej pojemności doziemnej C to $2/3C_z$. Gdzie C_z jest sumą rozłożonych pojemności doziemnych C'_z przedstawionych na rysunku 1. Wartość pojemności zastępczej C w odniesieniu do pojemności C_z wyznaczono porównując czasy odpowiedzi dzielnika na sygnał wejściowy dla układu z rysunku 1 i układu z rysunku 3, na którym przedstawiono uproszczony schemat dzielnika rezystancyjnego z zaznaczoną pojemnością zastępczą C . [1]



Rys.3. Schemat dzielnika rezystancyjnego z zastępczą pojemnością doziemną

W rzeczywistych układach dzielnika rezystancyjnego przyjmuje się pojemność doziemną $C_z=10pF$ na $1m$ wysokości kolumny dzielnika, a rezystancję $R=10k\Omega$. W celu zmniejszenia wpływu pojemności doziemnych i zapewnienia lepszej równomierności rozkładu napięcia wzdłuż dzielnika, stosuje się metalowe ekrany, w kształcie pierścieni o odpowiedniej konstrukcji, montowane w górnej

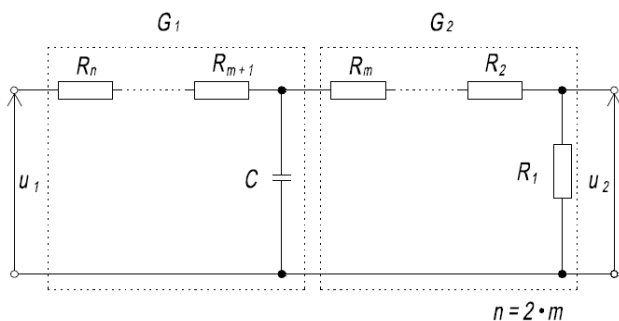
części denominatora. Rozwiązanie takie skraca stałą czasową denominatora i zmniejsza jego błędy związane z przetworzeniem sygnału. Stała czasowa jest wprost proporcjonalna do rezystancji i pojemności doziemnej denominatora. [1]

$$T = \frac{R \cdot C_z}{4}, \quad T = \frac{R \cdot C}{6} \quad (4)$$

Wzór (4) opisuje stałą czasową układu denominatorów przedstawionych na rysunku 1 i rysunku 3. Zmniejszenie rezystancji układu zmniejsza stałą czasową denominatora, ale wpływa na zwiększenie strat mocy w denominatoru. Więcej ciepła wydzieli się na rezystancji i większy będzie wpływ temperatury na parametry elementów denominatora. Zmniejszenie pojemności doziemnej również zmniejsza stałą czasową, ale wyznacznikiem tego parametru jest wysokość kolumny denominatora i jej kształt. [4]

3. TRANSMITANCJA DZIENNIKA

Dzielnik jest układem liniowy opisanym transmitancją. Należy zaznaczyć, że w rzeczywistych warunkach dzielnik pracuje w pewnym układzie pomiarowym i w praktyce nie można go rozpatrywać samodzielnie. Rozważmy teoretyczny układ denominatora składający się z kolumny n rezystorów o jednakowej wartości rezystancji. Do obliczeń przyjęto układ z zastępczą pojemnością doziemną przedstawioną na rysunku 3, pomijając pojemności własne rezystorów. Układ denominatora składający się z dwóch połączonych członów, inercyjnego pierwszego rzędu o transmitancji G_1 i proporcjonalnego o transmitancji G_2 , przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Schemat układu kolumny denominatora

W tym przypadku wyznaczenie transmitancji denominatora sprowadza się do wyznaczenia transmitancji zastępczej dwóch kaskadowo połączonych członów denominatora przedstawionego na rysunku 4, opisanej w dziedzinie operatorowej wzorem (5). Zakładając, że rezystancje w członach denominatora są jednakowe, po obliczeniach i podstawieniach do wzoru (5) zależności ze wzoru pomocniczego (6), otrzymujemy obliczoną transmitancję operatorową teoretycznego denominatora napięcia przedstawioną wzorem (7). Po ponownym podstawieniu zależności z wzorów (8) i uproszczeniu otrzymujemy wzór (9). W wzorach (5) i (6) oznaczono jako $Z_{12}(s)$ impedancję równoległego połączenia kondensatora C i szeregowo połączonych rezystorów $R_1 \div R_m$ z rysunku 4. Teoretyczny dzielnik napięcia jest elementem inercyjnym pierwszego rzędu. [5]

$$G(s) = \frac{Z_{12}(s)}{m \cdot R + Z_{12}(s)} \cdot \frac{R}{(m-1) \cdot R + R} \quad (5)$$

$$Z_{12}(s) = \frac{\frac{1}{s \cdot C} \cdot m \cdot R}{\frac{1}{s \cdot C} + m \cdot R} \quad (6)$$

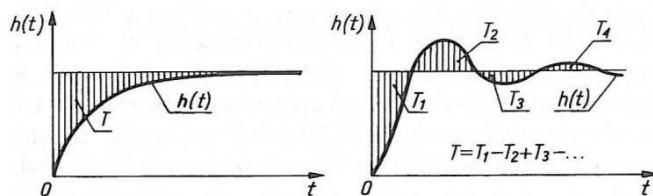
$$G(s) = \frac{\frac{1}{2}}{1 + \frac{m}{2} \cdot R \cdot C \cdot s} \cdot \frac{1}{m} \quad (7)$$

$$\frac{1}{2 \cdot m} = k, \quad \frac{m}{2} \cdot R \cdot C = T \quad (8)$$

$$G(s) = \frac{k}{1 + s \cdot T} \quad (9)$$

Istotnym parametrem dynamicznym rezystancyjnego denominatora wysokonapięciowego jest czas odpowiedzi, który można wyznaczyć z definicji na podstawie wzoru (10). Czas odpowiedzi możemy zdefiniować jako sumę algebraiczną obszarów zawartych między impulsem jednostkowym, a odpowiedzią układu denominatora na ten impuls. Na rysunku 5 przedstawiono typowe odpowiedzi na skok jednostkowy, gdzie $h(t)$ jest odpowiedzią skokową, a T czas odpowiedzi. [7]

$$T = \int_0^{\infty} (1 - h(t)) dt \quad (10)$$



Rys. 5. Typowe odpowiedzi na skok jednostkowy układu, odpowiedź aperiodyczna i oscylacyjna [1]

W układach rzeczywistych impuls jednostkowy nie jest praktycznie możliwy do osiągnięcia. W tej samej chwili czasowej rzeczywisty impuls nie może posiadać jednocześnie wartości 0 i 1, tak jak jest to zobrazowane w przebiegu teoretycznym. Rzeczywisty przebieg, impulsu zbliżonego do jednostkowego, posiada skończoną stromość narastania sygnału. Należałoby tu praktycznie rozważyć odpowiedź układu na impuls narastający, o możliwie dużej stromości narastania impulsu.

4. WNIOSKI

Dzielnik rezystancyjny spełniający określone warunki może być wykorzystany w układach pomiarowych do pomiaru wysokich napięć. Warunkiem jest odpowiednia kompensacja, w czasie pomiaru, pojemności elementów denominatora, tak aby zapewnić równomierny podział napięcia wzdłuż całej kolumny pomiarowej denominatora. Zmniejszając pojemność doziemną poprzez odpowiednią konstrukcję i możliwe, dopuszczalne zminimalizowanie gabarytów kolumny pomiarowej, zwiększamy dokładność podziału napięcia denominatora. Wysokonapięciowy dzielnik

rezystancyjny możemy rozpatrywać jako element inercyjny pierwszego rzędu.

5. LITERATURA

1. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć, WNT, Warszawa 1988, s. 266-271.
2. Błajszczak G., Olak J.: Rezystancyjny dzielnik napięcia do pomiaru wyższych harmoniczných w sieciach 400kV, Jurata 2011.
3. Nowak J.: Przetwarzanie wielkości charakteryzujących pole elektryczne i magnetyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
4. Ciuba M., Owiński M.: Porównanie temperaturowych własności pojemnościowych dzielników napięcia o różnych konstrukcjach członu wysokonapięciowego, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 270, 2015.
5. Dębowski A.: Automatyka podstawy teorii, WNT, Warszawa 2008.
6. Olejnik B.: Alternatywne metody pomiaru średniego napięcia w elektroenergetycznej sieci rozdzielczej, Zeszyt naukowy nr 78, Politechnika Poznańska, 2014.
7. Łasica A., Chaber B.: Badanie parametrów dynamicznych nowych konstrukcji udarowych dzielników napięć, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2017.

HIGH VOLTAGE RESISTANCE DIVIDER

A high voltage resistive divider is designed to lower the value of voltage to the level acceptable by the measuring instruments. Along with the increase of the input voltage and its changes over time, the influence of capacity on the accuracy of the divisor indications increases. The solution is to compensate the divider. A divider made of elements with the same impedance will be a compensated divider. In this case, the indication error will be related to the time of divider response from the input signal. The theoretical voltage divider is the first-order inertial element. It should be mentioned that in real conditions the divider operates in a certain measuring system and in practice it cannot be considered alone. The use of automatic control systems to adjust the parameters of the compensating elements of the divider can be a solution to reduce the measurement error.

Keywords: resistive divider, ground capacity, divisor transmittance.