

РОЗГЛЯД АНАЛІТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНОГО ВПЛИВУ НЕІДЕНТИЧНОСТІ РЕЗИСТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПЛЕЧА НА ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ

Бржезицький В.О., проф., д.т.н., Держук А.О., аспірант, Гаран Я.О., ст. викладач, к.т.н., Лісовий О.Р., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Тематика досліджень високовольтних подільників напруги в останні роки набуває все більшого поширення [1], оскільки в концепції «цифрова підстанція» високовольтні електромагнітні трансформатори напруги, як масштабні перетворювачі напруги, мають бути замінені на відповідні ширококутові подільники напруги. В публікації [1] вперше наведений детальний розгляд частотних характеристик високовольтного ширококутового подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча у граничному випадку неідентичності його ємнісних елементів. Проте, можливий також випадок, коли ємнісні елементи високовольтного плеча є строго (або практично) ідентичними, в той час як його резистивні елементи мають певну варіацію.

За схемою заміщення високовольтного ширококутового подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча (див. рис. 1) випадок, що розглядається в даній статті, відповідає умовам $C=C_1=C_2=\dots C_i\dots=C_n$, але $R_i=R_N(1\pm\beta)$, де R_N – номінальне значення резистивних елементів високовольтного плеча а β – їх допуск, виражений у відносних одиницях (наприклад, $0\leq\beta\leq 0,1$), причому половина резистивних елементів високовольтного плеча має значення $R'=R_N(1-\beta)$, а інша половина: $R''=R_N(1+\beta)$.

Метою роботи є формулювання системи співвідношень щодо частотних характеристик даного граничного випадку неідентичності елементів високовольтного плеча ширококутового подільника напруги.

Матеріали досліджень. Згідно загальної теорії ширококутових подільників напруги [2] вирази A для амплітудно-частотної (АЧХ) та φ – для фазо-частотної (ФЧХ) характеристик подільника напруги за рис. 1 можуть бути представлені у виді:

$$A = \frac{|U_{out}|}{|U_{in}|} = \frac{1}{K} A^*,$$
$$A^* = \sqrt{\frac{1 + \gamma^2}{\left(1 + \frac{K-1}{K} f\right)^2 + \gamma^2 \left(1 + \frac{K-1}{K} \delta\right)^2}} \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \left[\frac{(\delta - f)\gamma}{f + \frac{K}{K-1} + \gamma^2 \left(\delta + \frac{K}{K-1} \right)} \right], \quad (2)$$

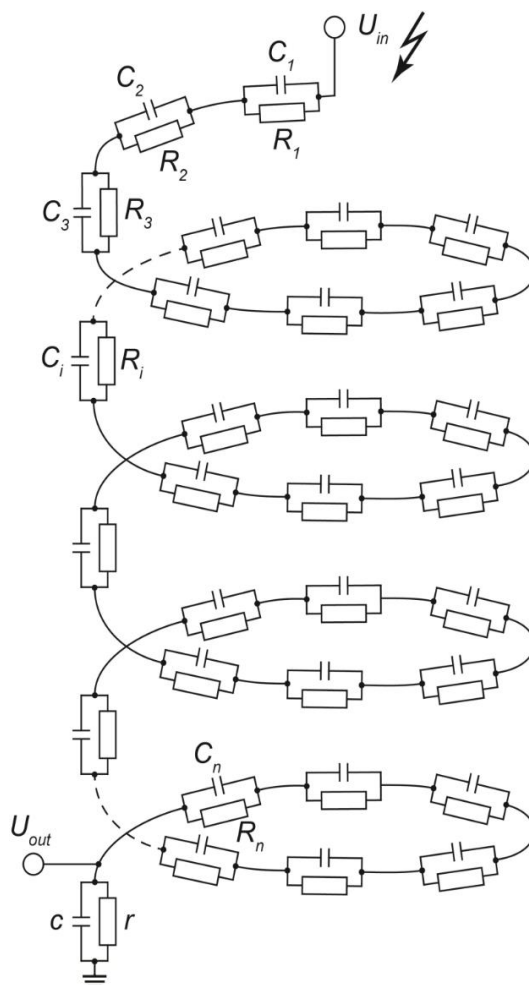


Рисунок 1 – Схема заміщення високовольтного подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча

де K – номінальне значення коефіцієнта ділення подільника напруги (у загальному випадку $K > 1$), A^* – нормоване значення АЧХ, $\gamma = \omega CR_0$ – безрозмірний параметр кутової частоти ω , $R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ – середнє значення R-елементів високовольтного плеча, яке для випадку, що розглядається, $R_0 \equiv R_N$, а f , δ – функції неідентичності елементів $\beta' = -\beta$ та $\beta'' = +\beta$, які визначаються нижче:

$$f = \frac{1}{2} D(\beta') + \frac{1}{2} D(\beta''), \quad \delta = \frac{1}{2} G(\beta') + \frac{1}{2} G(\beta''), \quad (3)$$

$$\text{де } D(\beta) = \frac{\gamma^2 [-3\beta^2 - \beta^3 + \gamma^2 (\beta^2 + \beta^3)]}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \beta^2)]}, \quad (4)$$

$$G = \frac{\beta^2 + \gamma^2[-3\beta^2 - 2\beta^3]}{(1 + \gamma^2)[1 + \gamma^2(1 + \beta)^2]} \quad (5)$$

*) При виведенні (1), (2) в [2] приймалися загальновідомі співвідношення для параметрів низьковольтного плеча подільника напруги $r = \frac{nR_N}{K-1}$, $c = \frac{C}{n}(K-1)$.

Підставляючи в (3) – (5) значення $\beta' = -\beta$ та $\beta'' = \beta$, одержимо

$$2f = \frac{\gamma^2[-3\beta^2 + \beta^3 + \gamma^2(\beta^2 - \beta^3)]}{(1 + \gamma^2)[1 + \gamma^2(1 - \beta)^2]} + \frac{\gamma^2[-3\beta^2 - \beta^3 + \gamma^2(\beta^2 + \beta^3)]}{(1 + \gamma^2)[1 + \gamma^2(1 + \beta)^2]}, \quad (6)$$

$$2\delta = \frac{\beta^2 + \gamma^2[-3\beta^2 + 2\beta^3]}{(1 + \gamma^2)[1 + \gamma^2(1 - \beta)^2]} + \frac{\beta^2 + \gamma^2[-3\beta^2 - 2\beta^3]}{(1 + \gamma^2)[1 + \gamma^2(1 + \beta)^2]} \quad (7)$$

Проведемо тестові перевірки одержаних рівнянь:

- якщо $\beta = 0$, то $A^* \equiv 1$ для будь-яких значень γ , K , оскільки вирази f , δ (6), (7) в цьому випадку дорівнюють нулю;
- якщо $\gamma = 0$, то також $A^* \equiv 1$ для будь-яких значень β , K , що фізично відповідає загальноприйнятній практиці калібрування широкосмугових подільників напруги на високій напрузі постійного струму;
- якщо $\gamma \rightarrow \infty$, то $\delta \rightarrow 0$ для будь-яких значень β , K , і $A^* \equiv 1$, що відповідає «подвійному» калібруванню подільника напруги за $\gamma = 0$ та $\gamma \rightarrow \infty$ (на постійному струмі та гранично високій частоті);
- якщо $\gamma \rightarrow 0$, то $\varphi \rightarrow 0$, що відповідає «чисто резистивному» варіанту схеми широкосмугового подільника напруги за низьких частот;
- якщо $\gamma \rightarrow \infty$, то $\varphi \rightarrow 0$, що відповідає «чисто ємнісному» варіанту схеми широкосмугового подільника напруги на високих частотах.

Висновки За одержаних позитивних тестових перевірок знайдених співвідношень можна в подальшому переходити до наступного етапу досліджень частотних характеристик широкосмугового подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча за наявності граничного випадку неідентичності його резистивних елементів.

Перелік посилань

1. Brzhezitsky V.O. Ultimate effect of non-identity of capacitive elements of high-voltage arm on frequency characteristics of voltage divider (analytical research) / V.O. Brzhezitsky, Y.O. Haran, A.O. Derzhuk, O.R. Protsenko, Y.O. Trotsenko, M.M. Dixit // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021, no. 4, pp. 46-52. doi: 10.20998/2074-272X.2021.4.06.
2. Anokhin Y. L. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement / Y. L. Anokhin, V. O. Brzhezitsky, Ya. O. Haran, I. M. Masliuchenko, O. P. Protsenko, Ye. O. Trotsenko // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – No. 6. – pp. 53-59. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.08.