

ДО ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНОГО ВПЛИВУ НЕІДЕНТИЧНОСТІ ЄМНІСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПЛЕЧА НА ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ

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

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. В публікації [1] кафедри теоретичної електротехніки наведені результати аналітичного дослідження граничного впливу неідентичності ємнісних елементів високовольтного плеча на частотні характеристики подільника напруги. В даній статті пропонуються рекомендації щодо використання результатів [1] у практиці вибору та експлуатації високовольтних широкосмугових подільників напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча.

Практичні дослідження широкосмугових подільників напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча показують суттєву нестабільність їхніх частотних характеристик, яка, наприклад, для серійного подільника напруги на 400 кВ [2] має порядок $\pm 0,26\%$ по коефіцієнту ділення та $\pm 3,6 \cdot 10^{-3}$ радіан по фазовому куту, що відповідає $\pm 12,4'$ (кутових хвилин). Однією з причин такої нестабільності частотних характеристик високовольтних широкосмугових подільників напруги може бути неідентичність ємнісних елементів високовольтного плеча, що показано в [1].

Метою роботи є вироблення практичних рекомендацій для оцінювання нестабільності частотних характеристик широкосмугових подільників напруги, обумовленої допуском ємнісних елементів високовольтного плеча.

Матеріали і результати досліджень. Згідно [1] максимальне відхилення A_{\max}^* нормованого значення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) широкосмугового подільника напруги в області $A^* > 1$ визначається виразом:

$$A_{\max}^* = 1 + 0,1255 \frac{K-1}{K} \Delta^2, \quad (1)$$

де K – номінальне значення коефіцієнта ділення подільника напруги, Δ – значення допуску ємнісних елементів високовольтного плеча подільника напруги у відносних одиницях (коли, половина ємнісних елементів має дійсне значення $C_{RV} = (1-\Delta)C_N$, а половина відповідно $C_{RV} = (1+\Delta)C_N$, де C_N – номінальне значення ємнісних елементів).

З другого боку, мінімальне значення A_{\min}^* в області $A^* < 1$ має вираз

$$A_{\min}^* = \left(1 + \frac{K-1}{K} \frac{\Delta^2}{1-\Delta^2}\right)^{-1}, \quad (2)$$

в аналогічних (1) позначеннях.

Тоді, амплітуда коливань АЧХ (у відсотках)

$$A_{АЧХ}, \% = \frac{A_{\max}^* - A_{\min}^*}{A_{\max}^* + A_{\min}^*} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Для фазо-частотної характеристики (ФЧХ) високовольтного ширококутового подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча з [1] слідує 2 граничних значення (у кутових хвилинах):

$$\varphi'_1 = 0 \text{ та } \varphi''_2 = -2252 \frac{K-1}{K} \Delta^2. \quad (4)$$

Звідси амплітуда коливань ФЧХ подільника напруги у кутових хвилинах може бути представлена у виді:

$$A'_{\text{ФЧХ}} = -0,5\varphi''_2 = 1126 \frac{K-1}{K} \Delta^2. \quad (5)$$

На рисунках 1, 2 представлені розраховані за формулами (4), (6) залежності амплітуд коливань амплітудно-частотної характеристики $A_{\text{АЧХ}}, \%$ та фазо-частотної характеристики $A'_{\text{ФЧХ}}$ ширококутового високовольтного подільника напруги від допуску ємнісних елементів його високовольтного плеча Δ (у відносних одиницях) за різних значень коефіцієнта ділення подільника напруги K .

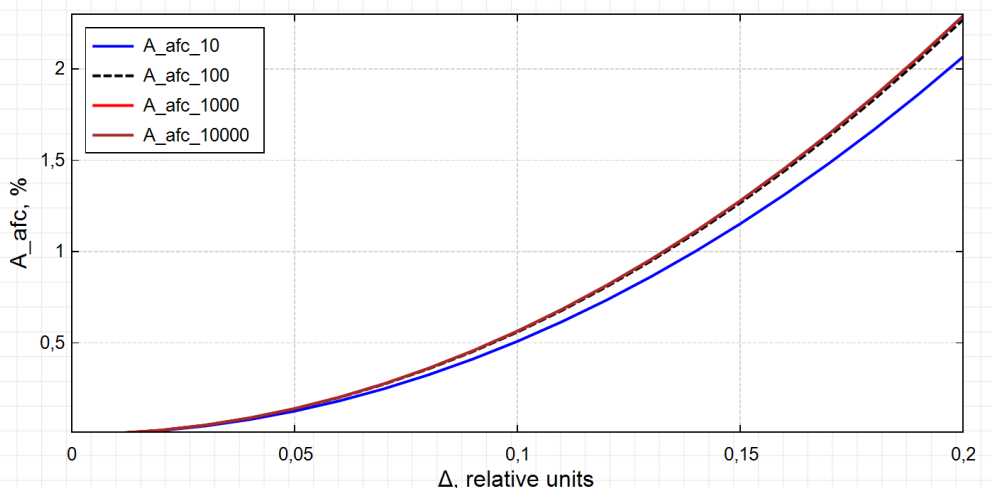


Рисунок 1 – Залежність амплітуди коливань АЧХ (у відсотках) ширококутового подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча від значення допуску Δ ємнісних елементів (у відносних одиницях) для різних значень коефіцієнта ділення подільника напруги K

Одержані залежності від Δ мають фактично параболічний характер, причому амплітуди відповідних коливань частотних характеристик є пропорційними множнику $\frac{K-1}{K}$, тобто, найбільш суттєво проявляються для значень $K \gg 1$.

Порівняння одержаних максимумів амплітуд коливань $A_{\text{АЧХ}}, \%$ та $A'_{\text{ФЧХ}}$ за $\Delta=0,2$ з даними [2] ($\pm 0,26\%$; $\pm 12,4'$) показує, що вплив неідентичності ємнісних елементів високовольтного плеча ширококутового подільника напруги може визивати суттєві нестабільності його частотних характеристик, і його необхідно враховувати в теорії високовольтних подільників напруги.

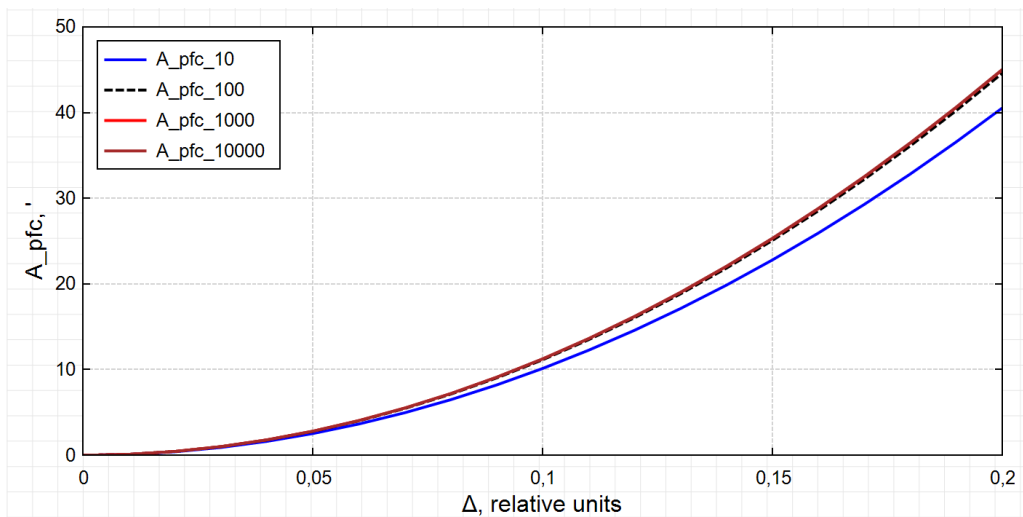


Рисунок 2 – Залежність амплітуди коливань ФЧХ (у кутових хвилинах) широкосмугового подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів високовольтного плеча від значення допуску Δ ємнісних елементів (у відносних одиницях) для різних значень коефіцієнта ділення подільника напруги K

Висновки. Вперше практично показано, що вплив неідентичності ємнісних елементів високовольтного плеча подільника напруги з паралельно-послідовним з'єднанням R-, C-елементів є одним з визначальних факторів і повинен бути врахованим в теорії і практиці високовольтних широкосмугових подільників напруги.

За формулами (4), (6) можна «миттєво» оцінити можливий рівень нестабільності частотних характеристик того або іншого серійного широкосмугового високовольтного подільника напруги, який є об'єктом купівлі чи досліджень або, за рисунками 1, 2 сформулювати вимоги до допустимої неідентичності виконання ємнісних елементів високовольтного плеча подільника напруги.

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. Dongdong Xu, Weiwei Zhang, Nan Wang, Guangtao Wang, Guangke Xu The power frequency voltage divider calibration device and its uncertainty. Energy Reports, Vol. 6, Supplement 2, 2020, pp. 380-384. ISSN 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.091>.