

# ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ВПЛИВУ НЕІДЕНТИЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ НА АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ

Бржезицький В.О., д.т.н., проф., Маслюченко І.М., к.т.н., доц.,  
Абрамчук Ю.В., студент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра техніки і електрофізики високих напруг*

**Вступ.** За концепцією «цифрова підстанція» [1] в якості високовольтних масштабних перетворювачів напруги в майбутньому замість традиційних, електромагнітних трансформаторів напруги альтернативно можуть розглядатись високовольтні широкосмугові подільники напруги. У зв'язку з цим в останні роки в публікаціях значна увага приділяється дослідженням характеристик високовольтних подільників напруги (ВПН), зокрема, визначенню стабільності їх коефіцієнтів ділення [2 – 6]. В [7] звернуто увагу на важливість використання в схемі ВПН резисторів з допуском не більше  $\pm 1\%$  задля забезпечення його високої точності.

В роботі [8] досліджено нестабільність амплітудно-частотної характеристики ВПН при використанні реального випадку розподілення ємнісних елементів його високовольтного плеча. Проте, залишається не вирішеним питання визначення граничного впливу неідентичності елементів високовольтного подільника напруги, зокрема, на його амплітудно-частотну характеристику (АЧХ).

**Мета роботи:** визначення умов та значення граничної нестабільності АЧХ ВПН, викликаной неідентичністю елементів його високовольтного плеча.

**Матеріали та результати досліджень.** В роботі [8] та інших публікаціях кафедри ТЕВН показано, що нормована амплітудно-частотна характеристика  $A(\omega)$  для ВПН має вид:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{1 + \gamma^2}{\left(1 + \frac{K-1}{K} f\right)^2 + \gamma^2 \left(1 + \frac{K-1}{K} \delta\right)^2}}, \quad (1)$$

де безрозмірний параметр кутової частоти  $\gamma = \omega R_0 C_0$ ,  $R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ ,  $C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$

усереднені значення  $R$ - та  $C$ - елементів високовольтного плеча, представленого паралельно-послідовним з'єднанням  $R_i$  та  $C_i$  - елементів,  $K$  - нормований коефіцієнт ділення подільника напруги.

З аналізу, проведеного в [8], можна зробити висновок, що найбільша дія нестабільності АЧХ ВПН буде відбуватись у випадку, коли розподілення по ємності елементів високовольтного плеча буде характеризуватись двома дискретними значеннями:  $\alpha$  та  $-\alpha$ , де  $\alpha = \frac{C_i - C_0}{C_0}$  (неідентичністю  $R$ -

елементів високовольтного плеча нехтуємо, оскільки розкид  $R$ - елементів, звичайно, є набагато меншим розкиду  $C$ - елементів).

У цьому випадку значення параметрів  $f$  та  $\delta$  матимуть вид:

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

$$\delta = \frac{\gamma^2 \alpha^2}{2(1 + \gamma^2)} \left[ \frac{\gamma^2(1 + \alpha) - (3 + \alpha)}{1 + \gamma^2(1 + \alpha)^2} + \frac{\gamma^2(1 - \alpha) - (3 - \alpha)}{1 + \gamma^2(1 - \alpha)^2} \right]. \quad (3)$$

Дослідження виразу  $A(\omega)$  з урахуванням (2, 3) показує, що у граничному випадку  $\omega \rightarrow 0$   $A(\omega) \rightarrow 1$ .

У другому граничному випадку  $\omega \rightarrow \infty$  ( $\gamma \rightarrow \infty$ ) з (1 – 3) маємо:

$$A_{\gamma \rightarrow \infty} = \frac{1}{1 + \frac{K-1}{K} \delta_{\gamma \rightarrow \infty}} = \frac{1}{1 + \frac{K-1}{K} \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2}} = \frac{1 - \alpha^2}{1 - \frac{\alpha^2}{K}}. \quad (4)$$

Оскільки для високовольтних подільників напруги  $K \gg 1$ , з (4) отримуємо:

$$A_{\gamma \rightarrow \infty} = 1 - \alpha^2. \quad (5)$$

Таблиця 1 – Значення АЧХ ВПН в залежності від параметрів  $\alpha, \gamma$

$\gamma$	$A(\omega)$			
	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,15$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$
$10^{-3}$	1.00000004	1.0000000225	1.00000001	1.0000000025
$10^{-2.5}$	1.00000004	1.0000000225	1.00000001	1.0000000025
$10^{-2}$	1.000003999	1.0000022494	1.0000009997	1.0000002499
$10^{-1.5}$	1.0000398961	1.0000224393	1.000009972	1.0000024925
$10^{-1}$	1.0003896856	1.0002189892	1.0000972355	1.0000242623
$10^{-0.5}$	1.0030495643	1.0017051458	1.0007532288	1.0001859589
$10^{-0.26}$	1.0049907896	1.0028082462	1.001247533	1.0003109904
$10^{-0.24}$	1.0049660385	1.0028021864	1.0012481098	1.0003126368
$10^0$	0.9977556999	0.9990826157	0.9997361673	1.0000007812
$10^{0.5}$	0.9665719561	0.9817952415	0.9921445192	0.9981413512
$10^1$	0.9606347712	0.9779485474	0.9902342999	0.9975738877
$10^{1.5}$	0.9600629249	0.9775449699	0.9900236299	0.9975075
$10^2$	0.9600062865	0.977504498	0.990002365	0.9975007511
$10^{2.5}$	0.9600006286	0.9775004498	0.9900002365	0.9975000751
$10^3$	0.9600000629	0.977500045	0.9900000237	0.9975000075

За формулами (1 – 3) були проведені розрахунки значень  $A(\omega)$  в залежності від параметрів  $\alpha$ ,  $\gamma$ , які наведені в табл. 1. Аналіз даних табл. 1 показує, що в області від  $\gamma = 0,001$  до  $\gamma \sim 0,562$  відбувається зростання АЧХ ВПН в області  $A(\omega) > 1$ . Далі, зі збільшенням  $\gamma$  відбувається зменшення амплітудно-частотної характеристики ВПН. В області  $\gamma \sim 1$  амплітудно-частотна характеристика досягає значення  $A(\omega) \sim 1$ . В подальшому, при зростанні  $\gamma$  відбувається різке зниження  $A(\omega)$  до значень, що визначаються формулою (5) при досягненні  $\gamma \sim 17,8$ . При збільшенні  $\gamma > 17,8$  значення амплітудно-частотної характеристики залишаються практично не змінними.

Сформульовані характерні особливості АЧХ є загальними для різних значень неідентичності ємнісних елементів високовольтного плеча ВПН.

Порівняно до впливу реального розподілення ємнісних елементів ВПН, дослідженого у [8], за даними табл. 1 можна дійсно визначити граничний вплив можливої неідентичності елементів високовольтного подільника напруги на його амплітудно-частотну характеристику.

#### **Висновки:**

1. Вперше одержані аналітичні вирази для визначення граничного впливу неідентичності ємнісних елементів на амплітудно-частотну характеристику високовольтного подільника напруги.

2. Досліджені загальні особливості залежності амплітудної характеристики високовольтного подільника напруги від частоти (безрозмірного параметру  $\gamma = \omega R_0 C_0$ ).

#### **Перелік посилань**

1. EN 50160:2010 «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks».

2. Yi Li; Ediriweera, M.K.; Emms, F.S.; Lohrasby, A., "Development of Precision DC High-Voltage Dividers" in Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 60, no.7, pp. 2211-2216, July 2011.

3. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Петренко О. В. Коректування частотних характеристик високовольтних подільників напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: "Політехніка", 2008. – С. 478-480.

4. Haiming Shao; Bo Liang; Feipeng Lin; Dongxue Dai; Zhi Li, "The voltage coefficient determination of high voltage capacitive divider by serial summation of voltage transformers," in Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014), 2014 Conference on, vol., no., pp. 772-773, 24-29 Aug. 2014.

5. Feipeng Lin; Huanghui Zhang; Haiming Shao; Bo Liang, "Research on voltage variation of DC high-voltage resistive divider by Measuring Leakage Current," in Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014), 2014 Conference on, vol., no., pp.384-385, 24-29 Aug. 2014.

6. Merev, A.; Hallstrom, J.K., "A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References," in Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.64, no.1, pp.184-189, Jan. 2015.

7. Prochazka, R.; Hlavacek, J.; Draxler, K.; Styblikova, R., "Precise 10 and 20 kV DC/AC resistive divider" in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International, vol., no., pp.774-777, 6-9 May 2013.

8. Соруш Атарод, В.А. Бржезицький. Нестабильность амплитудно-частотной характеристики высоковольтного делителя напряжения, обусловленная неидентичностью элементов его высоковольтного плеча // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. № 5 – с. 51-54.