

В.О. Бржезицький, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-9768-7544
І.М. Маслюченко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-6073-9649
М.Ю. Лапоша, аспірант, ORCID 0000-0003-0909-7876
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГРАНИЧНИЙ ВПЛИВ НЕІДЕНТИЧНОСТІ R-, C-ЕЛЕМЕНТІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ НА ЙОГО ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті розглянуто вплив неідентичності резистивних та ємнісних елементів високовольтного плеча змішаного подільника напруги на його частотні характеристики. Одержані аналітичні вирази для дослідження впливу неідентичності елементів високовольтного подільника напруги при граничному дискретному розподіленні цих елементів. Показано, що при даному дискретному розподіленні резистивних та ємнісних елементів вплив їх неідентичності на амплітуди коливань амплітудно-частотної характеристики та фазо-частотної характеристики подільника напруги збільшується більше ніж у n разів по відношенню до «трикутного» розподілення параметрів елементів при рівних значеннях їх максимальних відхилень (від середніх значень). Отримані в статті результати рекомендується використовувати для оцінки «зверху» впливу неідентичності резистивних та ємнісних елементів високовольтного подільника напруги на його частотні характеристики.

Ключові слова: високовольтний подільник напруги, неідентичність елементів, амплітудно-частотна характеристика, фазо-частотна характеристика

Вступ. Потреби зростання повноцінності інформації про стан електротехнічних об'єктів та їх характеристики викликають необхідність розвитку методів і засобів вимірювань високої напруги для сталих і перехідних режимів. Сучасна вимірювальна техніка надає можливість експериментального визначення умовно названих «низьких» напруг промислової частоти (~10...100 В) до рівня невизначеності вимірювань ~ 0,05% [1]. Але виникає питання допустимої невизначеності вимірювань високої напруги, зокрема, для контролю якості електроенергії [2 – 4] та інших цілей. При цьому верхня межа частоти складових напруги досягає 148,5 кГц і вище [3]. В зв'язку з цим в [5, 6] поставлене питання про стабільність частотних характеристик високовольтних подільників напруги (ВПН), як єдиного засобу, що допускає вимірювання високих напруг в діапазоні частот від нуля до одиниць та десятків мегагерц.

Тематика розвитку досліджень подільників напруги в останній час набуває особливої актуальності, в зв'язку з перспективою заміни ними традиційних високовольтних електромагнітних трансформаторів напруги в концепції «цифрова підстанція» [7].

В цьому відношенні показовим є розвиток досліджень високовольтних подільників напруги в останніх зарубіжних публікаціях [8 – 13].

Так, в [8] запропонований метод «подвоєння напруги», що дозволяє виявити нестабільність коефіцієнта ділення ВПН від 10 до 500 кВ на рівні 1 мВ/1 кВ, тобто 10^{-6} відносних одиниць, або 0,0001%.

В [9] запропонований метод дослідження зміни коефіцієнту ділення ВПН промислової частоти за допомогою порівняння з трансформаторами напруги до $110/\sqrt{3}$ кВ.

В [10] досліджена модель ВПН з використанням методу оцінки струмів витоку в його конструкції, що забезпечує невизначеність вимірювання його коефіцієнта ділення до 4×10^{-6} відносних одиниць, або 0,0004%.

В [11] показано, що при використанні стабілітронів в якості структурних елементів ВПН, невизначеність вимірювання його коефіцієнта ділення може досягати 0,0005%.

В [12] відпрацьована нова конструкція модулів резисторів та виконана оцінка невизначеності вимірювання зміни коефіцієнта ділення ВПН до 1000 кВ на рівні 0,0005%.

В [13] показана важливість використання в схемі ВПН резисторів з допуском $\pm 1\%$ для досягнення його високої точності, обговорюється можливість приєднання ємнісної складової до схеми резистивного ВПН для розширення його робочого діапазону частот.

В аналітичних дослідженнях високовольтних подільників напруги значення опорів та ємностей їх

елементів, зазвичай, обираються ідентичними, або ж такими, що змінюються за заданим законом. Але навіть у випадку «ідеального» початкового підбору елементів значення їх опору і ємностей можуть змінюватись у часі, що пов'язано з впливом зовнішніх умов та ряду факторів. Тому виникає необхідність розглядати характеристики подільника напруги з урахуванням неідентичності його елементів.

Високовольтне плече подільника змішаного типу можна розглядати у вигляді кола, що містить n паралельно-послідовно з'єднаних резистивних та ємнісних елементів R_i, C_i (рис. 1), де R_i, C_i – відповідно, елементи високовольтного плеча, r, x – елементи низьковольтного плеча подільника напруги [5].

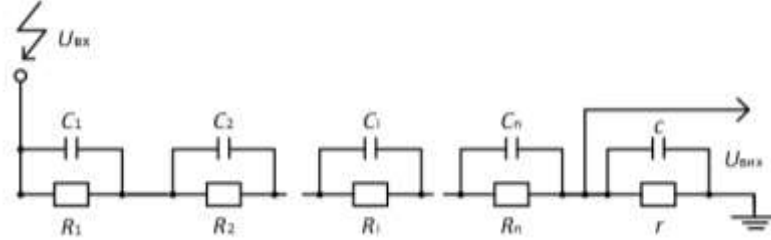


Рисунок 1 – Схема високовольтного подільника напруги змішаного типу за [5]

В [5] одержані загальні вирази для залежності амплітудно-частотної A та фазо-частотної φ характеристик ВПН від безрозмірного параметра частоти $\gamma = \omega R_0 C_0$, де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, R_0, C_0 – усереднені значення R -, C -елементів високовольтного плеча:

$$R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

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

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

де k – номінальне значення коефіцієнта ділення подільника напруги, відповідно до якого визначаються:

$$r = \frac{nR_0}{k-1}, \quad c = \frac{C_0}{n} (k-1), \quad (3)$$

а параметри $f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$, $\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i$ враховують усереднені по елементам високовольтного плеча функції неідентичності його елементів $\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0}$, $\beta_i = \frac{R_i - R_0}{R_0}$ у вигляді виразів:

$$D_i = \frac{\gamma^2 (T_i + \gamma^2 S_i)}{(1+\gamma^2)[1+\gamma^2(1+\beta_i)^2(1+\alpha_i)^2]}, \quad (4)$$

$$G_i = \frac{\beta_i^2 + 2\alpha_i\beta_i + \alpha_i\beta_i^2 + \gamma^2(P_i + \gamma^2 Q_i)}{(1+\gamma^2)[1+\gamma^2(1+\beta_i)^2(1+\alpha_i)^2]}, \quad (5)$$

де $Q_i = \alpha_i^2(1 + \alpha_i)(1 + \beta_i)^2$,

$$T_i = -(6\alpha_i\beta_i + 6\alpha_i\beta_i^2 + 2\alpha_i\beta_i^3 + \alpha_i^2 + 3\alpha_i^2\beta_i + 3\alpha_i^2\beta_i^2 + \alpha_i^2\beta_i^3 + 3\beta_i^2 + \beta_i^3),$$

$$S_i = 2\alpha_i\beta_i + 4\alpha_i\beta_i^2 + 2\alpha_i\beta_i^3 + 3\alpha_i^2 + 7\alpha_i^2\beta_i + 5\alpha_i^2\beta_i^2 + 2\alpha_i^3 + 4\alpha_i^3\beta_i + 2\alpha_i^3\beta_i^2 + \beta_i^2 + \beta_i^3 + \alpha_i^2\beta_i^3,$$

$$P_i = -(6\alpha_i\beta_i + 9\alpha_i\beta_i^2 + 4\alpha_i\beta_i^3 + 3\alpha_i^2 + 8\alpha_i^2\beta_i + 7\alpha_i^2\beta_i^2 + 2\alpha_i^2\beta_i^3 + \alpha_i^3 + 2\alpha_i^3\beta_i + \alpha_i^3\beta_i^2 + 3\beta_i^2 + 2\beta_i^3).$$

Слід зазначити, що вирази (1 – 5) одержані в [5] у загальному випадку, без допущення малості параметрів $\alpha_i, \beta_i, \gamma$. У випадку відсутності неідентичності R_i, C_i елементів $\alpha_i = 0, \beta_i = 0$, з (4), (5) одержимо $f \equiv 0, \delta \equiv 0$, і відповідно $A^* \equiv 1$ (1) та $\varphi \equiv 0$ (2).

Мета та завдання. В попередній роботі [5] були розраховані залежності $A^*(\gamma), \varphi(\gamma)$ для неідентичності конденсаторів та резисторів високовольтного плеча подільника напруги, що відповідає

випадку «трикутного» закону рівнобічного розподілення вірогідності «випадання» $p(\alpha)$, $p(\beta)$ при максимальних значеннях відхилень $\alpha_{\max} = \pm\Delta_1$, $\beta_{\max} = \pm\Delta_2$.

Метою даного дослідження є визначення граничного впливу неідентичності R -; C -елементів високовольтного плеча змішаного високовольтного подільника напруги на його амплітудно- та фазо- частотні характеристики.

В роботі, для досягнення мети вирішувались наступні наукові задачі:

- побудова математичної моделі високовольтного подільника напруги, з урахування граничного впливу неідентичності R_i , C_i – елементів високовольтного плеча;

- визначення впливу неідентичності R_i , C_i – елементів при використанні різних значень відхилень від середніх значень ємності конденсаторів та опору резисторів високовольтного плеча подільника напруги.

Матеріал та результати дослідження. Оскільки кількість n – елементів високовольтного плеча досягає сотень і тисяч одиниць, необхідно в подальшому при знаходженні f , δ переходити до функцій статистичного розподілення α , β . За матеріалами [5], можливим для практики є «трикутне» розподілення α , β . Але граничний вплив на частотні характеристики ВПН буде здійснювати неідентичність R -; C -елементів дискретного типу, коли половина конденсаторів високовольтного плеча буде мати ємність $C_0(1 - \Delta_1)$, а друга половина характеризуватиметься ємністю $C_0(1 + \Delta_1)$. Аналогічно, резистори будуть мати значення $R_0(1 - \Delta_2)$ та $R_0(1 + \Delta_2)$. Оскільки «випадання» цих значень елементів високовольтного плеча є рівновірогідним, функції f , δ у виразах (1 – 3) наберуть вигляд:

$$f = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} D(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + D(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = \Delta_2) + \\ D(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + D(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = \Delta_2) \end{array} \right], \quad (6)$$

$$\delta = \frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} G(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + G(\alpha_i = -\Delta_1; \beta_i = \Delta_2) + \\ G(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = -\Delta_2) + G(\alpha_i = \Delta_1; \beta_i = \Delta_2) \end{array} \right], \quad (7)$$

де $D(\alpha_i; \beta_i)$, $G(\alpha_i; \beta_i)$ – функції α_i ; β_i за (4), (5).

Якщо підставити ці значення f , δ у формули (1), (2) можна дослідити вплив неідентичності R -; C -елементів дискретного типу на амплітудно-частотну характеристику A (АЧХ) та фазочастотну характеристику φ (ФЧХ) високовольтного подільника напруги.

Згідно (1) – (7), за допомогою пакету MATHLAB, розраховуємо величини невизначеності за напругою $A' = (A^* - 1) \times 100\%$ та невизначеності за кутом φ ВПН в залежності від безрозмірного параметра частоти γ , якому надаються значення:

$$\gamma = 10^{-3}; 10^{-2.75}; 10^{-2.5}; 10^{-2.25}; 10^{-2}; 10^{-1.75}; 10^{-1.5}; 10^{-1.25}; 10^{-1}; 10^{-0.75}; 10^{-0.5}; 10^{-0.25}; 10^0; 10^{0.25}; 10^{0.5}; 10^{0.75}; 10^1; 10^{1.25}; 10^{1.5}; 10^{1.75}; 10^2; 10^{2.25}; 10^{2.5}; 10^{2.75}; 10^3.$$

Оскільки коефіцієнти ділення ВПН звичайно $k \gg 1$, його конкретне значення в (1, 2) не є визначальним. У зв'язку з цим при проведених розрахунках в (1, 2) використовувалось «типове» значення $k = 10^4$.

На рис. 2 побудовані одержані залежності $A'(\%)$ та $\varphi(^{\circ})$ ВПН від параметра γ , який змінюється в діапазоні від 10^{-3} до 10^3 відносних одиниць.

Порівнюючи дані рис. 2 з відповідними даними рис. 3 [5] приходимо до висновку, що перехід від «трикутного» розподілення неідентичності R -елементів до граничного дискретного розподілення, прийнятого в даній роботі, при рівних значеннях максимального відхилення $\alpha = \pm 0,01$ ($\pm 1\%$) збільшує «амплітуду» коливань АЧХ та ФЧХ високовольтного подільника напруги у 5,68 рази (як по $A'(\%)$, так і по $\varphi(^{\circ})$). Зберігається квадратична залежність амплітуд коливань АЧХ та ФЧХ ВПН від розміру граничного відхилення Δ_2 [5].

В подальшому було розраховано залежність $A'(\%)$, $\varphi(^{\circ})$ від γ для «протилежних» значень $\Delta_1 = 0,01$ та $\Delta_2 = 0$, яка представлена на рис. 3

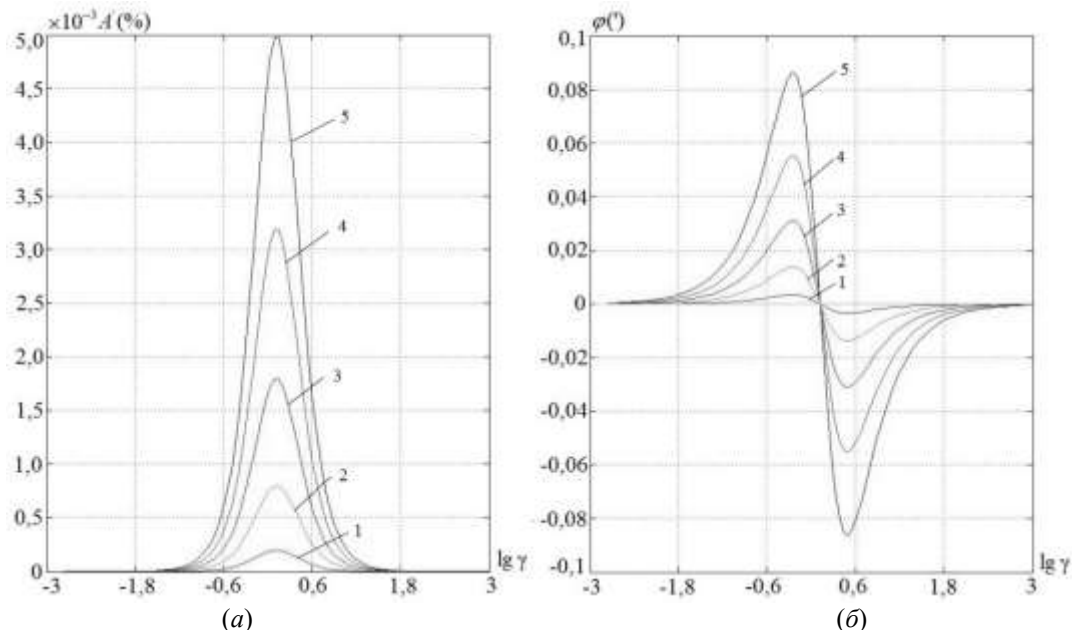


Рисунок 2 – Залежності невизначеності за напругою $A'(\%)$, вираженою у відсотках, (а) та невизначеності за кутом $\varphi(^{\circ})$, вираженою у кутових хвилинах, (б) ВПН від безрозмірного параметру частоти γ для значень $\Delta_2 = 0,002$ (позначення 1); $\Delta_2 = 0,004$ (позначення 2); $\Delta_2 = 0,006$ (позначення 3); $\Delta_2 = 0,008$ (позначення 4); $\Delta_2 = 0,01$ (позначення 5) при значенні $\Delta_1 = 0$

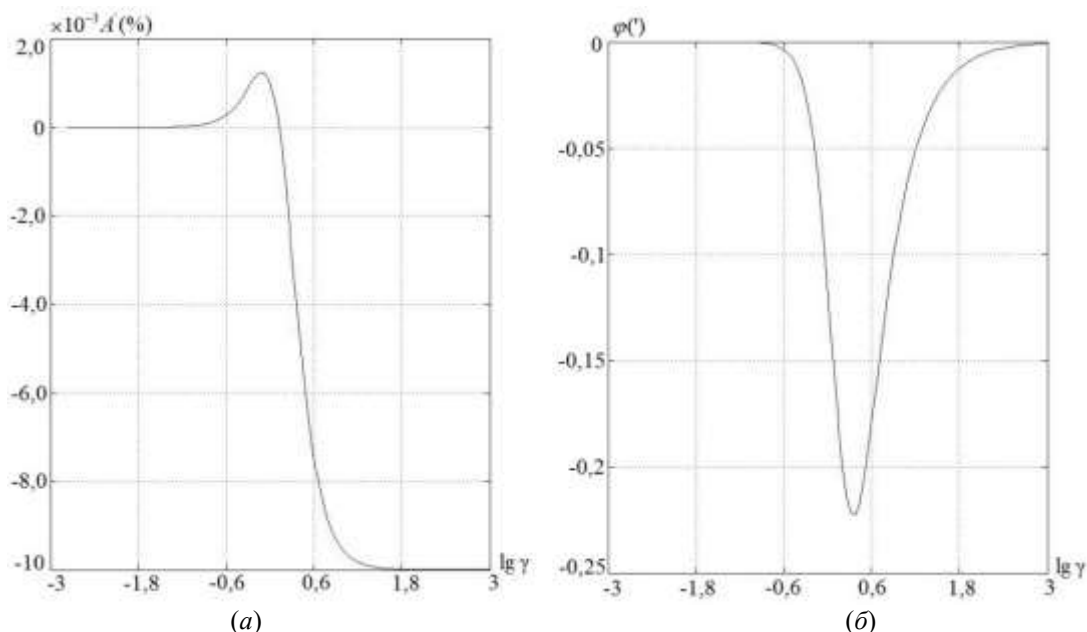


Рисунок 3 – Залежність невизначеності за напругою $A'(\%)$ (а) та невизначеності за кутом $\varphi(^{\circ})$ (б) ВПН від безрозмірного параметру частоти γ для значень $\Delta_1 = 0,01$ та $\Delta_2 = 0$

Порівнюючи амплітуди коливань АЧХ та ФЧХ ВПН, представлених на рис. 3, з відповідними даними рис. 2 (позначення 5) приходимо до висновку, що вплив неідентичності С-елементів (порівняно до неідентичності R-елементів) є у 2,26 разів сильнішим для АЧХ та у 2,58 разів сильнішим для ФЧХ високовольтного подільника напруги.

На рис. 4 зображено сімейство залежностей $A'(\%)$, $\varphi(^{\circ})$ від γ для значення $\Delta_1 = 0,04$ при значеннях $\Delta_2 = 0,000; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01$.

Аналіз одержаних залежностей показує, що вони практично співпадають між собою. Збільшення Δ_2 від 0 до 0,01 (при загальному значенні $\Delta_1 = 0,04$) збільшує амплітуду коливань АЧХ всього лиш у 1,021 рази, а відповідну амплітуду коливань ФЧХ – у 1,029 рази. Таким чином, можна зробити висновок,

що при значеннях $\Delta_1 \geq 0,04$ (4%), вплив неідентичності резисторів $\Delta_2 = 0,01$ (1%) є нехтуваним.

Порівняння залежностей A' (%) та φ (°) від γ для значень $\Delta_1 = 0,125$ та $\Delta_2 = 0,01$ у випадках розглянутого в даній роботі дискретного та «трикутного» [5] розподілення показує збільшення амплітуди коливань АЧХ у 5,67 разів та ФЧХ – у 5,70 разів. Аналогічні результати при порівнянні дискретного та «трикутного» розподілень неідентичності R -, C -елементів ВПН мають місце для інших сполучень параметрів Δ_1 та Δ_2 .

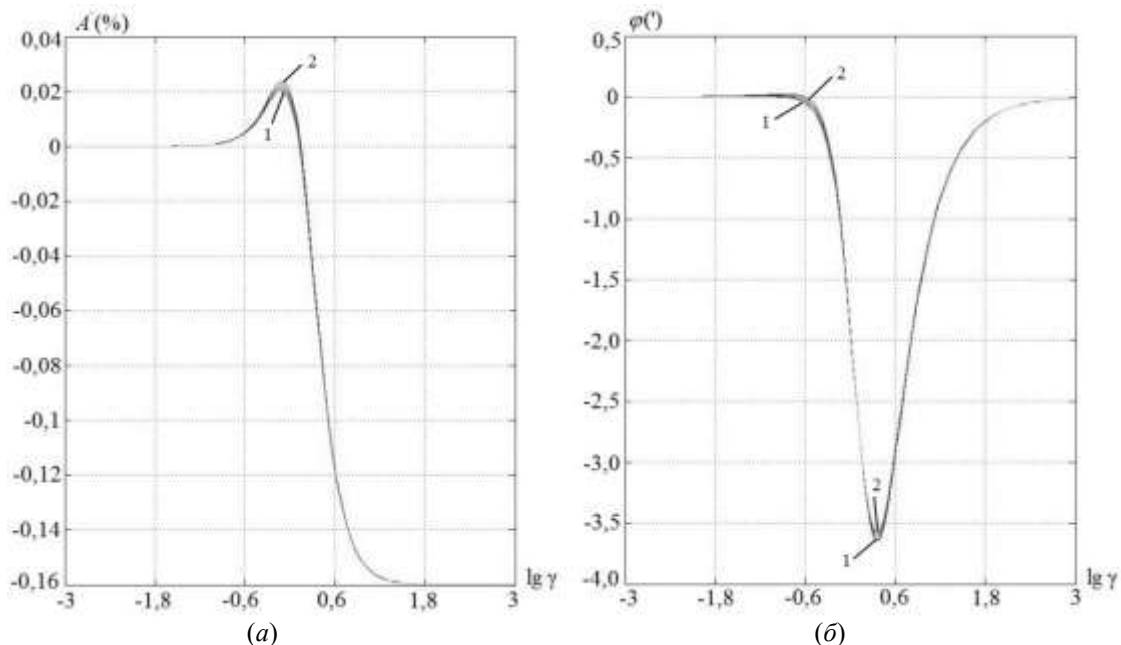


Рисунок 4 – Залежності невизначеності за напругою A' (%) (а) та невизначеності за кутом φ (°) (б) ВПН від безрозмірного параметру частоти γ для фіксованого $\Delta_1 = 0,04$ при зміні значень Δ_2 в діапазоні: 0,000; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01, при цьому нульовому значенню Δ_2 відповідає позначенню 1, а максимальному значенню Δ_2 – позначення 2

Висновки

1. Вперше одержані аналітичні вирази, що дозволяють досліджувати спільний вплив неідентичності R -, C -елементів високовольтного плеча змішаного ємнісно-омічного подільника напруги на його амплітудно- та фазо-частотні характеристики для граничного дискретного розподілення цих елементів.

2. Перехід від «трикутного» закону розподілення неідентичності R -, C -елементів високовольтного плеча до граничного дискретного розподілення цих елементів з рівними значеннями їх максимальних відхилень Δ_1 , Δ_2 приводить до збільшення амплітуд коливань їх амплітудно- та фазо-частотних характеристик у 5,67 – 5,70 разів.

3. Показано, що найбільший вплив неідентичності R -, C -елементів високовольтного плеча на його частотні характеристики проявляється при його граничному дискретному розподіленні, яке може розглядатись як найгірший варіант впливу неідентичності складових елементів високовольтного плеча подільника напруги.

Список використаної літератури

1. Івашенко М. М. Аналіз існуючих еталонів електричної напруги змінного струму / М. М. Івашенко, В. А. Єрмолаєв // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – №. 4. – С. 104–106.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Киев: Госстандарт Украины – 1999. – 31 с. Введ. с 01.01.2000.
3. EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. – 2010. – 45 p.
4. ДСТУ ІЕС 61000-4-30. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, ІДТ). – 2010. – 56 с.
5. Бржезицький В. О. Частотні характеристики, обумовлені неідентичністю R , C -елементів високовольтного подільника напруги, призначеного для вимірювання показників якості електроенергії / В. О. Бржезицький, О. М. Десятов, І. М. Маслюченко, І. С. Яценко // Наукові праці НУХТ. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 158 – 172.

6. Бржезицький В. О. Коректування частотних характеристик високовольтних подільників напруги / В. О. Бржезицький, Є. О. Троценко, О. В. Петренко // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики". – Київ: "Політехніка", 2008. – С. 478-480.
7. ДСТУ ІЕС 61850-3. Комунікаційні мережі та системи на підстанціях. Частина 3. Загальні технічні вимоги (ІЕС 61850-3:2002, IDT). – 2013. – 16 с.
8. Qian L. Method to Determine the Ratio Error of DC High-Voltage Dividers / L. Qian, W. Leren, Z. Shuhan, T. Yuejin, X. Yan // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2012. – Vol. 61, №. 4. – P.1072-1078.
9. Haiming S. The voltage coefficient determination of high-voltage capacitive divider by serial summation of voltage transformers / S. Haiming, L. Bo, L. Feipeng, D. Dongxue, L. Zhi // Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014). – 2014. – P. 772-773.
10. Feipeng L. Research on voltage variation of DC high-voltage resistive divider by Measuring Leakage Current / L. Feipeng, Huang hui Zhang, S. Haiming, L. Bo // Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014). – 2014. – P. 384-385.
11. Merev A. A Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References / A. Merev, J.K. Hallstrom // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2015. – Vol. 64, №. 1. – P. 184-189.
12. Yi L. Development of Precision DC High-Voltage Dividers / L. Yi, M. K Ediriweera, F. S. Emms, A. Lohrasby // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2011. – Vol. 60, №. 7. – P. 2211-2216
13. Prochazka R. Precise 10 and 20 kV DC/AC resistive divider / R. Prochazka, J. Hlavacek, K. Draxler, R. Styblikova // Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – 2013. – P. 774-777.

V. Brzhezyskiy, Dr. Sc. Sciences, prof., ORCID 0000-0002-9768-7544

I. Maslyuchenko, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-6073-9649

M. Laposha, Ph.D student, ORCID 0000-0003-0909-7876

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MAXIMUM INFLUENCE OF NONIDENTICAL R- AND C-ELEMENTS OF A HIGH-VOLTAGE DIVIDER ON ITS FREQUENCY CHARACTERISTICS

This paper describes the impact of non-identical resistive and capacitive elements of high-voltage arm of mixed voltage divider on its frequency characteristics. The authors emphasized the general features and substantiated main shortcomings of existing methods of calculating the characteristics of high-voltage dividers. The analytical expressions received for influence study of non-identical elements of a high-voltage divider at extreme discrete distribution of these elements. Feature of the received analytical expressions is that they are valid for any values of not identity as for resistive, and capacitive elements, and also their cumulative action. It is shown that the selected discrete distribution of resistive and capacitive elements influence of their not identity on fluctuations of amplitude frequency response and the phase-frequency characteristic of a voltage divider increases more than five times in relation to "triangular" distribution of parameters of elements in case of equal values of their maximum deviations (from mean values). The maximum influence of not identity of resistive and capacitive elements of a high-voltage arm on its frequency characteristics was studied. The influence becomes significant at its extreme discrete distribution and can be considered as the worst case of influence of not identity of the components of a high-voltage arm of a voltage divider. The results received in the article are recommended for assessment "from above" of influence of not identity of resistive and capacitive elements of a high-voltage divider on his frequency characteristics that allows to define possible values of not identity of elements of a high-voltage arm depending on permissible instability of frequency characteristics of the voltage divider.

Keywords: high-voltage divider, the non-identical elements, the amplitude-frequency characteristic, the phase-frequency characteristic

References

1. Ivashchenko M. M., Yermolaiev V. A. (2010). Analiz isnuichykh etaloniv elektrychnoi napruhy zminnoho strumu. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*, №. 4, 104–106.
2. GOST 13109. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektronsabzhenija obshhego naznachenija (1997). 31.
3. EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. (2010). 45.
4. DSTU IEC 61000-4-30. Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4-30. Metody vyprovuvannia ta vymiriuvannia. Vymiriuvannia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii (IEC 61000 – 4-30:2008, IDT). – 2010 – 56.

5. Brzhezyskyi V. O., Desiatov O. M., Masliuchenko I. M., Yatsenko I. S. (2017). Chastotni kharakterystyky, obumovleni neidentychnistiu R, C-elementiv vysokovoltnoho podilnyka napruhy, pryznachenoho dlia vymyruvannia pokaznykiv yakosti elektroenerhii. *Naukovi pratsi NUKhT*, T. 23, № 1, 158 – 172.
6. Brzhezyskyi V. O., Trotsenko Ye. O., Petrenko O. V. (2008). Korektuvannya chastotnih kharakteristik visokovoltnih podilnykiv napruhi. *Dopovidi za materialami Mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi molodih uchenih, aspirantiv i studentiv "Suchasni problemy elektroenergotekhniky ta avtomatyky"*, 478-480.
7. DSTU IEC 61850-3. Komunikatsiini merezhi ta systemy na pidstantsiiakh. Chastyna 3. Zahalni tekhnichni vymohy (IES 61850-3:2002, IDT). (2013). 16.
8. Qian L., Leren W., Shuhan Z., Yuejin T., Yan X. (2012). Method to Determine the Ratio Error of DC High-Voltage Dividers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, №. 4, 1072-1078.
9. Haiming S., Bo L., Feipeng L., Dongxue D., Zhi L. (2014). The voltage coefficient determination of high-voltage capacitive divider by serial summation of voltage transformers. *Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 772-773.
10. Feipeng L., Huang hui Zhang, Haiming S., Bo L. (2014). Research on voltage variation of DC high-voltage resistive divider by Measuring Leakage Current. *Conference Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 384-385.
11. Merev A. A., Hallstrom J. K. (2015). Reference System for Measuring High-DC Voltage Based on Voltage References. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, №. 1, 184-189.
12. Yi L., Ediriweera M. K., Emms F. S., Lohrasby A. (2011). Development of Precision DC High-Voltage Dividers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, №. 7, 2211-2216
13. Prochazka R., Hlavacek J., Draxler K., Styblikova R. (2013). Precise 10 and 20 kV DC/AC resistive divider. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 774-777.

УДК 621.391.823

В.А. Бржезицький, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-9768-7544

И.Н. Маслюченко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-6073-9649

М.Ю. Лапша, аспирант, ORCID 0000-0003-0909-7876

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
**ПРЕДЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НЕИДЕНТИЧНОСТИ R-, C-ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕГО ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

В статье рассмотрено влияние неидентичности резистивных и емкостных элементов высоковольтного плеча смешанного делителя напряжения на его частотные характеристики. Получены аналитические выражения для исследования влияния неидентичности элементов высоковольтного делителя напряжения при предельном дискретном распределении этих элементов. Показано, что при данном дискретном распределении резистивных и емкостных элементов влияние их неидентичности на амплитуды колебаний амплитудно-частотной характеристики и фазо-частотной характеристики делителя напряжения увеличивается более чем в пять раз по отношению к «треугольному» распределению параметров элементов при равных значениях их максимальных отклонений (от средних значений). Полученные в статье результаты рекомендуются использовать для оценки «сверху» влияния неидентичности резистивных и емкостных элементов высоковольтного делителя напряжения на его частотные характеристики.

Ключевые слова: высоковольтный делитель напряжения, неидентичность элементов, амплитудно-частотная характеристика, фазо-частотная характеристика

Надійшла 12.03.2017

Received 12.03.2017