

УДК 621.3.027.7

Соруш Атарод, В.А. Бржезицкий

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕИДЕНТИЧНОСТЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПЛЕЧА

Based on repeated measurements, we define real distribution of capacity values of condensers of a high-voltage shoulder of a potential divider with the assumed deviation from the nominal equal to $\pm 5\%$. We show that the given distribution is asymmetric in relation to rating value (22 nF). Renormalization of received distribution was done in relation to the average capacity value of condensers. We investigate the influence of real distribution of condensers capacities on instability of the amplitude frequency characteristic (AFC) of a high-voltage potential divider. We demonstrate that the influence of the real distribution of condensers capacities with the deviation $\pm 5\%$ on AFC instability of a divider is less expressed in relation to the law of normal distribution with an average quadratic deviation equal to $\pm 5\%$. We prove that the deviation of condensers capacity of a high-voltage shoulder $\pm 5\%$ is acceptable. The set deviation of capacities $\pm 10\%$ usually leads to unacceptably high instability of AFC of a high-voltage potential divider.

Вступ

Обычно к измерениям высоких напряжений выдвигаются значительно менее “жесткие” требования в сравнении с требованиями к измерениям напряжений аналогичных форм зависимости во времени в диапазоне десятков–сотен вольт, которые, в отличие от высоких напряжений, называют “низкими” напряжениями. Указанное положение обусловлено сложными, нелинейными процессами и пространственно-полевыми взаимодействиями, которые характерны для устройств высокого напряжения [1, 2].

Развитие теории высоковольтных делителей напряжения является актуальным в связи с тем, что эта категория высоковольтных масштабных преобразователей необходима для определения показателей качества электрической энергии на высоком напряжении [3].

Высоковольтные делители напряжения приобретают в последнее время особое значение в системах мониторинга качества электрической энергии, работающих непосредственно в электрических сетях высокого напряжения. Схема замещения высоковольтного плеча делителя напряжения обычно содержит значительное количество резистивно-емкостных элементов, соединенных параллельно-последовательно [4]. При этом большое значение имеет вид распределения емкостей конденсаторов, принадлежащих, как правило, к одному номиналу [5].

В [5] проведено исследование неустойчивости амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) высоковольтного делителя напряжения при нормальном законе распределения значений емкостных элементов высоковольтного плеча, в т.ч. при среднеквадратическом отклонении данного распределения 5% (а также 10%).

Постановка задачи

Целью работы является анализ результатов экспериментального исследования (на основе многократных измерений) реального распределения по значениям емкости конденсаторов, используемых в конструкции высоковольтного плеча делителя напряжения до уровня 100 кВ, а также определение особенностей АЧХ делителя, обусловленных данным распределением.

Материалы экспериментального исследования

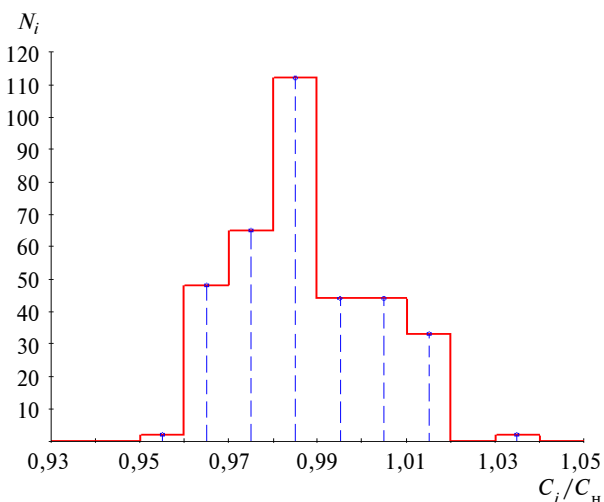
Измерения значений емкости проводились с помощью моста Р-5083 для выборки конденсаторов типа РНЕ 450 с номинальным значением емкости $C_n = 22$ нФ при общем количестве конденсаторов $N_\Sigma = 350$ (шт.).

В табл. 1 приведены полученные значения емкостей конденсаторов соответственно выбранным границам их отклонения от номинала $C_n = 22$ нФ.

Таблиця 1. Значення ємкості C_i -елементів в діапазонах їх відхилення від номінального значення C_H

N виборки i	Границы значений емкости C_i	Количество конденсаторов N_i	Вероятность p_i , отн. ед.
1	$0,95 C_H \leq C_1 < 0,96 C_H$	2	$\frac{2}{350} = 0,005714$
2	$0,96 C_H \leq C_2 < 0,97 C_H$	48	$\frac{48}{350} = 0,137143$
3	$0,97 C_H \leq C_3 < 0,98 C_H$	65	$\frac{65}{350} = 0,185714$
4	$0,98 C_H \leq C_4 < 0,99 C_H$	112	$\frac{112}{350} = 0,32$
5	$0,99 C_H \leq C_5 < 1,00 C_H$	44	$\frac{44}{350} = 0,125714$
6	$1,00 C_H \leq C_6 < 1,01 C_H$	44	$\frac{44}{350} = 0,125714$
7	$1,01 C_H \leq C_7 < 1,02 C_H$	33	$\frac{33}{350} = 0,094286$
8	$1,02 C_H \leq C_8 < 1,03 C_H$	0	0
9	$1,03 C_H \leq C_9 < 1,04 C_H$	2	$\frac{2}{350} = 0,005714$
10	$1,04 C_H \leq C_{10} < 1,05 C_H$	0	0
Всего N_Σ	–	$\sum N_i = 350$	$\sum p_i = 1$

Полученное реальное распределение выборки значений емкости конденсаторов представлено на рис. 1. Видно, что преобладающая часть из выборки 350 шт. конденсаторов находится в “минусовом” допуске (271 шт.), однако в пределах нормированного изготовителем допуска ($\pm 5\%$ от C_H). С точки зрения производителя конденсаторов данная ситуация является типовой, так как позволяет экономить материалы.

Рис. 1. Фактическое распределение значений емкости конденсаторов C_i в зависимости от отношения C_i/C_H

В дальнейшем в расчетах принималось, что полученные значения емкости конденсаторов соответствуют средним значениям соответствующих диапазонов (показаны на рис. 1 штриховыми линиями). При этом среднее значение емкости конденсаторов всей выборки, согласно расчету, составило $C_0 = 21,71651429$ нФ.

Для выполнения расчетов АЧХ высоковольтного делителя напряжения для полученного реального распределения выборки конденсаторов согласно табл. 1 необходимо преобразовать данные рис. 1 (зависимость N_i от C_i/C_H) к зависимости вероятности $p_i = \frac{N_i}{\sum N_i}$ от α_i , где α_i соответствует отклонению емкости от среднего значения выборки $\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0}$.

Соответственно средним значениям α_i (которые отмечены штриховыми линиями на рис. 1) сформируем массив данных распределения емкостей высоковольтного плеча согласно табл. 2.

Сравнение графиков на рис. 1 и 2 показывает, что распределение емкости относительно номинального значения C_H носит явно выраженный несимметричный характер.

Таблиця 2. Преобразованный массив распределения емкости конденсаторов высоковольтного плеча делителя

N вы-борки i	Среднее значение $\bar{\alpha}_i$	Количество конденсаторов N_i	Вероятность p_i , отн. ед.
1	-0,0325335	2	0,005714
2	-0,0224030	48	0,137143
3	-0,0122724	65	0,185714
4	-0,0021419	112	0,320000
5	0,0079887	44	0,125714
6	0,0181192	44	0,125714
7	0,0282497	33	0,094286
8	0,0383803	0	0
9	0,0485108	2	0,005714
10	0,0586413	0	0
Всего N_{Σ}	–	$\sum N_i = 350$	$\sum p_i = 1$

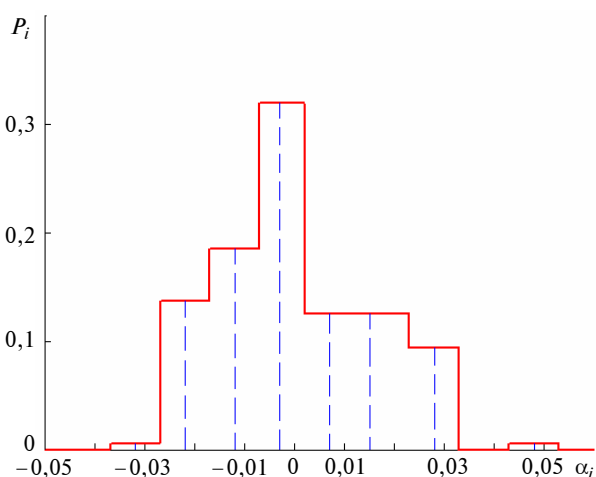


Рис. 2. Экспериментально полученное распределение емкости конденсаторов высоковольтного плеча делителя в зависимости от отклонения C_i -емкости

$$\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0} \text{ от среднего значения}$$

Материалы теоретического исследования

Согласно [5] выражение амплитудно-частотной характеристики делителя с параллельно-последовательным соединением резистивно-емкостных элементов высоковольтного плеча может быть представлено в виде

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

где $A = A(\omega)$ – зависимость амплитуды АЧХ делителя от частоты, K – номинальное значение коэффициента деления, $\gamma = \omega R_0 C_0$ – параметр, пропорциональный произведению средних значений R -, C -элементов высоковольтного плеча, f, δ – сложные функции, зависящие от закона распределения его емкостных элементов.

Для нормального закона распределения емкостных элементов согласно [5] получим

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \times \int_{-\theta}^{\theta} \frac{\alpha^2 [\gamma^2(3 + 2\alpha) - 1]}{1 + \gamma^2(1 + \alpha)^2} e^{(-\alpha^2/2\sigma^2)} d\alpha,$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \times \int_{-\theta}^{\theta} \frac{\alpha^2 [\gamma^2(1 + \alpha) - (3 + \alpha)]}{1 + \gamma^2(1 + \alpha)^2} e^{(-\alpha^2/2\sigma^2)} d\alpha,$$

где σ – значение среднего квадратического отклонения (СКО) распределения; θ – параметр, определяющий границы области интегрирования по α (обычно $\theta = 5\sigma$).

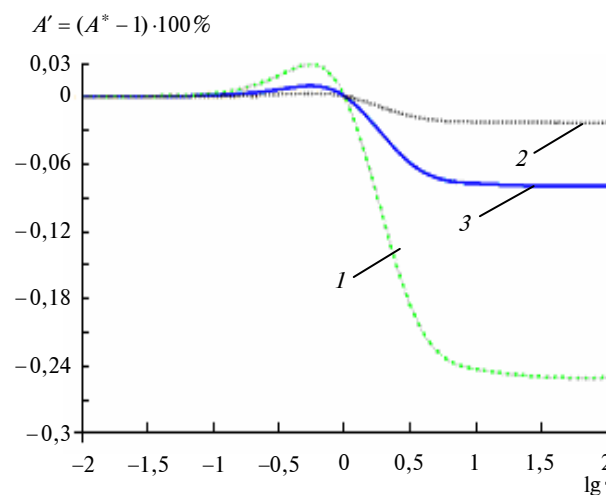


Рис. 3. Зависимость модифицированной функции АЧХ от частоты γ : 1 – нормальный закон распределения емкостных элементов со значением среднего квадратического отклонения $\sigma = 0,05$ (5%); 2 – реальный закон распределения емкостных элементов с допуском $\pm 5\%$; 3 – аналогичное реальному закону распределение емкостных элементов с допуском $\pm 10\%$

В [5] проведені розрахунки модифікованої функції АЧХ $A' = (A^* - 1) \cdot 100\%$ в залежності від γ (для типового значення $K = 10^4$), результати яких представлені на рис. 3 (крива 1).

Для загального випадку довільного розподілу значень ємкостей високовольтного плеча делителя напруги придатні формули (1) з вираженнями f , δ :

$$f = \frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{\gamma^2 \alpha_i^2 [\gamma^2 (3 + 2\alpha_i) - 1]}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \alpha_i)^2]},$$

$$\delta = \frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{\gamma^2 \alpha_i^2 [\gamma^2 (1 + \alpha_i) - (3 + \alpha_i)]}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \alpha_i)^2]},$$

де N_{Σ} – сумарне число ємкостних елементів делителя, i – i -й елемент високовольтного плеча, $\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0}$.

На рис. 3 крива 2 показує отриману залежність $A' = (A^* - 1) \cdot 100\%$ від $\lg \gamma$ для реального розподілу ємкостних елементів з допуском $\pm 5\%$. Крива 3 показує отриману залежність $A' = (A^* - 1) \cdot 100\%$ від $\lg \gamma$ для аналогічного реального закону розподілу ємкостних елементів, однак з допуском $\pm 10\%$.

Як випливає з даних рис. 3, вплив реального розподілу ємкостних елементів на АЧХ делителя є більш ослабленим

порівняно з законом нормального розподілу ємкостей (з допуском $\pm 5\%$). Однак вплив на АЧХ розподілу ємкостей з допуском $\pm 10\%$ є вже порівняним з першим варіантом.

Висновки

Отримані результати показують різке відхилення експериментального закону розподілу ємкостей високовольтного плеча від передбачуваного теоретичного [5]. В зв'язі з цим для проведення розрахунків характеристик високовольтного делителя напруги обов'язковим є перетворення реального несиметричного розподілу до приведеного "симетричного" розподілу по відношенню до середнього значення ємкості, визначеного для повної вибірки.

Розподіл ємкостей високовольтного плеча з допуском $\pm 5\%$ викликає менш виражену нестабільність АЧХ високовольтного делителя напруги порівняно з випадком АЧХ для нормального закону розподілу ємкостей з значенням СКО $\sigma = 5\%$. Розподіл ємкостей високовольтного плеча з допуском $\pm 10\%$ призводить до вже суттєвої нестабільності АЧХ високовольтного делителя напруги, що необхідно враховувати при виготовленні прецизійних делителів напруги.

В розвитку роботи передбачається проведення аналогічних досліджень для фазочастотної характеристики високовольтного делителя напруги.

1. *Техніка і електрофізика високих напруг*: Навч. посібник / В.О. Бржезицький, А.В. Ісакова, В.В. Рудаков та ін.; за ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ" : ТОВ "Торнадо", 2005. – 926 с.
2. *High-voltage test techniques. Part 2: Measuring Systems, Internationale standard IEC 60-2, 2003*, 139 pp.
3. *Бржезицький В.А.* Прецизійні масштабні вимірні перетворювачі високої напруги перемінного струму: Дис. ... док. техн. наук. – К.: НТУУ "КПІ", 1992. – 513 с.
4. *Атарод С., Бржезицький В.О., Гаран Я.О., Маслюченко І.М.* Розрахунок наведеного потенціалу в задачі високовольтного подільника напруги // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 4. – С. 65–67.
5. *Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Кікало В.М.* Частотні характеристики високовольтних подільників напруги // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – № 5. – С. 66–70.