

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫХ С НЕИДЕНТИЧНОСТЬЮ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

АТАРОД СОРУШ, В.О. БРЖЕЗИЦКИЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ФАЗОЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ, ПОВ'ЯЗАНИХ З НЕІДЕНТИЧНІСТЮ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

АТАРОД СОРООШ, V.A. BRZHEZYTSKY

RESEARCH OF CHANGES OF THE INSTABILITY OF PHASE FREQUENCY CHARACTERISTIC OF HIGH-VOLTAGE DIVIDER OF THE PRESSURE, CONNECTED WITH NON-IDENTITY ITS ELEMENTS

Анотация. На основе проведения многократных измерений определено реальное распределение значений емкости конденсаторов высоковольтного плеча делителя напряжения с допуском отклонения от номинала, равным $\pm 5\%$. Показано, что данное распределение является асимметричным по отношению к номинальному значению (22нФ). Проведена перенормировка полученного распределения по отношению к среднему значению емкости конденсаторов. Исследуется влияние реального распределения емкостей конденсаторов на нестабильность фазочастотной характеристики высоковольтного делителя напряжения. Показано, что влияние реального распределения емкостей конденсаторов с допуском $\pm 5\%$ на нестабильность ФЧХ делителя является менее выраженным по отношению к закону нормального распределения со средним квадратическим отклонением равным $\pm 5\%$. Обосновывается в качестве приемлемого допуск на отклонение емкости конденсаторов высоковольтного плеча $\pm 5\%$. Обычно задаваемый допуск на отклонение емкостей $\pm 10\%$ приводит к значительной нестабильности ФЧХ высоковольтного делителя напряжения.

Ключевые слова: изменение фазочастотной характеристики высоковольтного делителя напряжения

Анотація. На основі проведення багаторазових вимірювань визначено реальний розподіл значень ємності конденсаторів високовольтного плеча подільника напруги з допуском відхилення від номіналу, рівним $\pm 5\%$. Показано, що даний розподіл є асиметричним по відношенню до номінального значення (22нФ). Проведено перенормування отриманого розподілу по відношенню до середнього значення ємності конденсаторів. Досліджується вплив реального розподілу ємностей конденсаторів на нестабільність фазочастотної характеристики високовольтного подільника напруги. Показано, що вплив реального розподілу ємностей конденсаторів з допуском $\pm 5\%$ на нестабільність ФЧХ подільника є менш вираженим по відношенню до закону нормального розподілу з середнім квадратичним відхиленням, що дорівнює $\pm 5\%$. Обґрунтовується як прийнятний допуск на відхилення ємності конденсаторів високовольтного плеча $\pm 5\%$. Зазвичай заданий допуск на відхилення ємностей $\pm 10\%$ призводить до значної нестабільності ФЧХ високовольтного подільника напруги.

Ключові слова: зміна фазочастотної характеристики високовольтного подільника напруги

Annotation. On the basis of repeated measurements a real distribution of capacity values of condensers of a high-voltage shoulder of a potential divider is defined with the assumed deviation from the nominal, which is equal to $\pm 5\%$. It is shown that the given distribution is asymmetric in the relation to rating value (22nF). The renormalization of the received distribution was done in the relation to the average capacity value of condensers. The influence of real distribution of condensers capacities on instability of the phase frequency characteristic (PFC) of a high-voltage potential divider is being researched. It is shown that the influence of the real distribution of condensers capacities with the deviation $\pm 5\%$ on instability of PFC of a divider is less expressed in the relation to the law of normal distribution with an average quadratic deviation, equal to $\pm 5\%$. A deviation

of condensers capacity of a high-voltage shoulder $\pm 5\%$ is proved to be acceptable. Usually the set deviation of capacities $\pm 10\%$ leads to unacceptably high instability of PFC of a high-voltage potential divider.

Key words: change of the instability of phase frequency characteristic of high-voltage divider

Введение. Обычно к измерениям высоких напряжений выдвигаются значительно менее «жесткие» требования в сравнении с измерениями 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 важное значение имеет вид распределения емкостей конденсаторов, принадлежащих, как правило, к одному номиналу [5].

В [5] проведено исследование фазочастотной характеристики (ФЧХ) высоковольтного делителя напряжения при нормальном законе распределения значений емкостных элементов высоковольтного плеча, в том числе – при среднеквадратическом отклонении данного распределения, равном 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 ФЧХ 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 $C_H = 22$ нФ при общем количестве конденсаторов $N_{\Sigma} = 350$ (штук).

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

Таблица 1. Значения емкости C_i - элементов в диапазонах от номинального значения C_H

№ выборки, i	Границы значений емкости, C_i	Количество конденсаторов, N_i	Вероятность p_i (относит. единиц)
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. По данным рис.1 видно, что преобладающая часть из выборки 350 штук конденсаторов находится в "минусовом" допуске (271 шт.), однако в пределах нормированного изготовителем допуска ($\pm 5\%$ от C_H). Исходя из интересов производителя конденсаторов, данная ситуация является типовой, так как позволяет экономить материалы.

В дальнейшем в расчетах принималось, что полученные значения емкости конденсаторов соответствуют средним значениям соответствующих диапазонов (показаны на рис.1 прерывистыми линиями). При этом среднее значение емкости конденсаторов всей выборки согласно расчету составило $C_0 = 21.71651429$ нФ.

При выполнении расчетов ФЧХ 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.

Таблица 2. Преобразованный массив распределения емкости конденсаторов высоковольтного плеча делителя.

№ выборки i	Среднее значение α_i	Количество конденсаторов, N_i	Вероятность p_i (относ.единиц)
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}		$\sum N_i = 350$	$\sum p_i = 1$

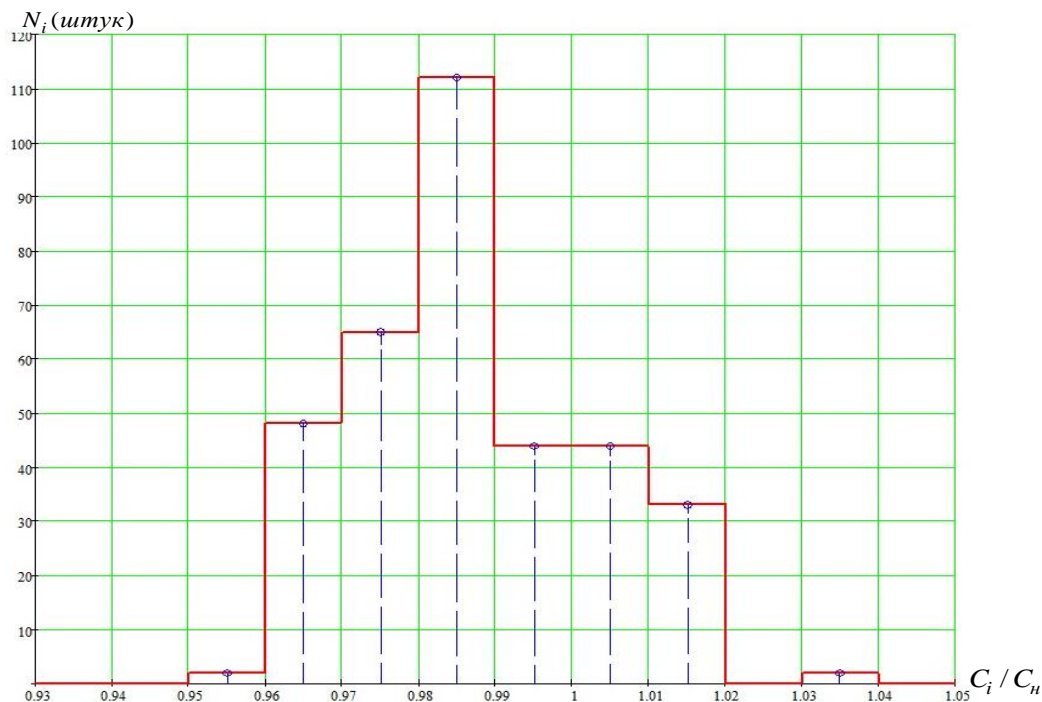


Рис. 1. Фактическое распределение значений емкости конденсаторов C_i в зависимости от отношения C_i / C_n .

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

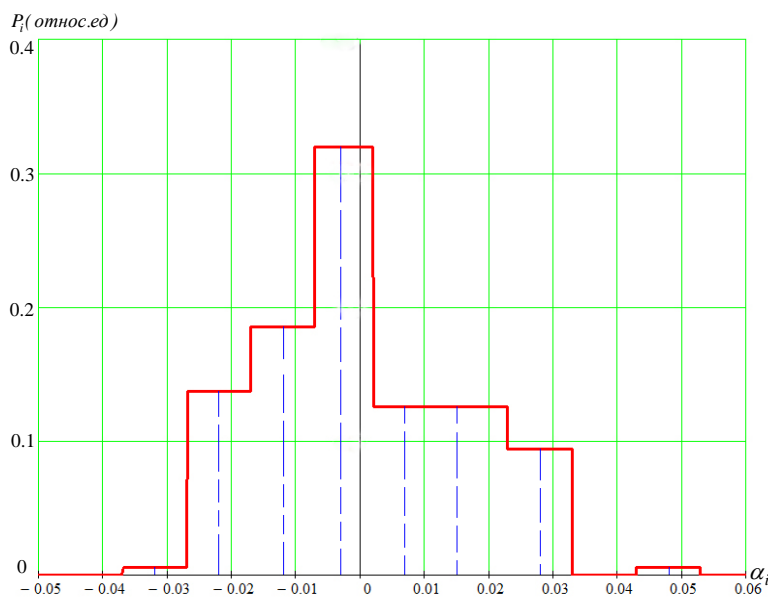


Рис. 2. Экспериментально полученное распределение емкости конденсаторов высоковольтного плеча делителя в зависимости от отклонения C_i -емкости $\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0}$ от среднего значения.

Материалы теоретического исследования. Согласно [5] выражение фазочастотной характеристики (ФЧХ) делителя с параллельно-последовательным соединением резистивно-емкостных элементов может быть представлено в виде:

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

где $\phi = \phi(\omega)$ – зависимость разности фазовых углов выходного и входного напряжений 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]

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

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

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

В [5] проведены расчеты функции ФЧХ $\phi(\omega)$ в зависимости от γ ($K = 10^4$), результаты которых представлены на рис. 3 (кривая 1).

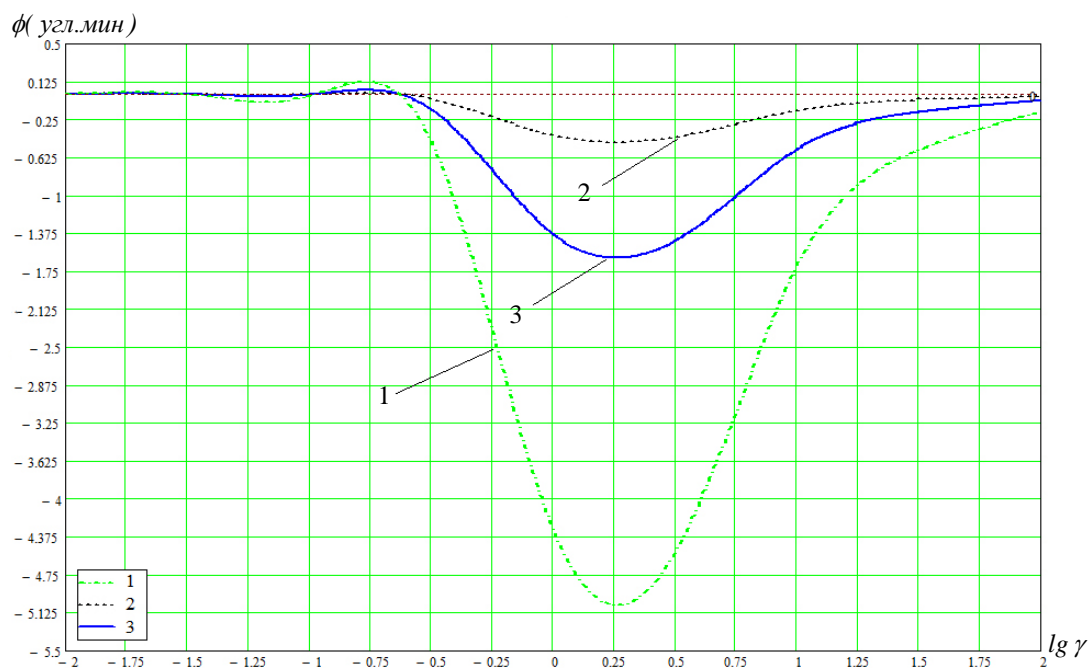


Рис. 3. Зависимость функции $\phi(\omega)$ от частоты (параметра γ) для случаев: 1 – нормального закона

распределения емкостных элементов со значением среднего квадратического отклонения $\sigma = 0,05$ (5 %); 2 – реального закона распределения емкостных элементов с допуском ± 5 %; 3 – аналогичного реальному закону распределения емкостных элементов с допуском ± 10 %.

Для общего случая произвольного распределения значений емкостей высоковольтного плеча делителя напряжения пригодна формула (1) с выражениями f, δ :

$$f = \frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{\gamma^2 \alpha_i^2 [\gamma^2 (3 + 2\alpha_i) - 1]}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \alpha_i)^2]}, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{1}{N_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{\gamma^2 \alpha_i^2 [\gamma^2 (1 + \alpha_i) - (3 + \alpha_i)]}{(1 + \gamma^2) [1 + \gamma^2 (1 + \alpha_i)^2]}. \quad (5)$$

где N_{Σ} – обозначает суммарное количество емкостных элементов делителя.

Кривая 2 показывает полученную зависимость $\phi(\omega)$ от $\lg \gamma$ для реального распределения емкостных элементов с допуском $\pm 5\%$.

Кривая 3 показывает полученную зависимость $\phi(\omega)$ от $\lg \gamma$ для аналогичного реальному закону распределения емкостных элементов однако с допуском $\pm 10\%$.

Как следует из данных рис. 3, влияние реального распределения емкостных элементов на ФЧХ делителя является более ослабленным по сравнению с законом нормального распределения емкостей (с допуском $\pm 5\%$). Однако влияние на ФЧХ распределения емкостей с допуском $\pm 10\%$ является уже сравнимым с вариантом 1.

Выводы.

1. Полученные результаты показывают резкое отличие экспериментального закона распределения емкостей высоковольтного плеча от предполагаемого теоретического [5].

2. В связи с этим для проведения расчетов характеристик высоковольтного делителя напряжения обязательным является преобразование реального несимметричного распределения к приведенному "симметричному" распределению по отношению к среднему значению емкости, определенному для полной выборки.

3. Распределение емкостей высоковольтного плеча с допуском $\pm 5\%$ вызывает менее выраженную нестабильность ФЧХ высоковольтного делителя напряжения по отношению к нормальному закону распределения емкостей со значением СКО $\sigma = 5\%$.

4. Распределение емкостей высоковольтного плеча с допуском $\pm 10\%$ приводит к существенной нестабильности ФЧХ высоковольтного делителя напряжения, что необходимо учитывать при изготовлении прецизионных делителей напряжения.

Литература

1. Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг. Навч. Посібник/За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХПІ» - Торнадо, 2005.- 926 с.
2. Internationale standard IEC 60-2/ High-voltage test techniques.- Part2: Measuring Systems-2003-139 p.
3. Бржезицкий В. А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока/ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Киевский политехнический институт. – Киев, 1992. – 513 с.
4. Атарод С., Бржезицкий 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. Бржезицкий В.О., Проценко О.Р., Кікало В.М. Частотні характеристики високовольтних подільників напруги. «Технічна електродинаміка» - № 5-2007. – с. 66-70.Рр.