

УДК 621.317.3

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.205132

ОПТИМИЗАЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Бржезицкий В. А., Троценко Е. А., Гаран Я. А.

Объектом исследования является схема широкополосного ёмкостно-омического делителя напряжения с последовательно-параллельным соединением его резистивных и ёмкостных элементов. Долгие годы применение делителей напряжения ограничивалось измерением различных напряжений в условиях высоковольтных лабораторий. Однако делители напряжения, по сравнению с трансформаторами напряжения, характеризуются более широкой полосой пропускания, поэтому они стали рассматриваться как одно из основных средств измерения напряжений в высоковольтных электрических сетях. Одним из катализаторов внедрения этого решения может стать интенсивное развитие концепции Smart Grid, которая требует новых, более совершенных средств мониторинга качества электроэнергии. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования, направленные на снижение погрешности широкополосных делителей напряжения, являются важными.

Задача оптимальной корректировки низковольтного плеча делителя напряжения была решена с помощью применения элементов линейного программирования для исследования функции систематической погрешности.

В данной работе представлены результаты исследования корректировки амплитудно-частотной характеристики делителя напряжения, которые направлены на снижение его погрешности. Для этого был найден такой параметр оптимизации значения ёмкости низковольтного плеча, при котором абсолютное значение положительного и отрицательного максимума систематической погрешности ёмкостно-омического делителя напряжения будут одинаковыми. Расчеты были выполнены для различных значений коэффициента деления делителя напряжения. Полученные массивы данных обобщены в виде трёхмерных графиков.

Работа вносит вклад в дальнейшее развитие теории высоковольтных делителей напряжения. В результате проведенных исследований показана возможность оптимизации амплитудно-частотной характеристики широкополосного ёмкостно-омического делителя напряжения путём варьирования значения ёмкости его низковольтного плеча. Проведенные исследования являются перспективными в связи с тем, что данная категория высоковольтных масштабных преобразователей имеет возможности стать обязательной для определения показателей качества электрической энергии непосредственно в высоковольтных сетях.

Ключевые слова: делитель напряжения, амплитудно-частотная характеристика, качество электрической энергии, высоковольтные масштабные преобразователи.

1. Введение

Измерение показателей качества электроэнергии необходимо при её производстве, распределении и потреблении. Кроме того, проведение измерений необходимо для обеспечения возможности управления качеством электроэнергии как видом продукции. Для этой цели принимаются технические и организационные меры, направленные на достижение соответствия показателей качества электроэнергии требованиям международных стандартов, например, стандарта IEC 61000-4-30:2015. В современных условиях внимание к качеству электроэнергии непрерывно возрастает, поскольку качество электроэнергии определяет во многих случаях возможность работоспособности множества сложных приборов, ответственного оборудования и целых систем. Эта задача требует создания измерительных средств, обладающих крайне низкой погрешностью и возможностью измерения напряжений широкого спектра частот. Среди масштабных преобразователей высоких напряжений следует выделить трансформаторы напряжения и делители напряжения. Долгие годы применение делителей напряжения ограничивалось измерением различных напряжений [1, 2] в условиях высоковольтных лабораторий. Однако, делители, по сравнению с трансформаторами напряжения характеризуются более широкой полосой пропускания, поэтому многими исследователями они стали рассматриваться как одно из основных средств измерения напряжений в высоковольтных электрических сетях [3–5]. Авторы также считают, что делители напряжения обладают гораздо большим потенциалом для усовершенствования, чем измерительные трансформаторы напряжения. В связи с этим на кафедре теоретической электротехники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Украина) были начаты исследования возможности применения делителей напряжения для измерения показателей качества электроэнергии [6–8]. Выполняемые работы содержат как экспериментальные, так и теоретические исследования возможности применения делителей напряжения вместо трансформаторов напряжения для измерения показателей качества электрической энергии. Таким образом, *объектом исследования* является схема широкополосного ёмкостно-омического делителя напряжения с последовательно-параллельным соединением его резистивных и ёмкостных элементов. А *цель работы* заключается в исследовании корректировки амплитудно-частотной характеристики делителя напряжения, которые направлены на снижение его погрешности.

2. Методика проведения исследований

Делитель напряжения, построенный с учётом деления напряжения по комплексным сопротивлениям, принято называть смешанным ёмкостно-омическим делителем напряжения с последовательно-параллельным

соединением его резистивных и ёмкостных элементов. Обобщенная схема замещения делителя напряжения такого типа, которая также дает общее представление о размещении элементов делителя напряжения в пространстве, показана на рис. 1.

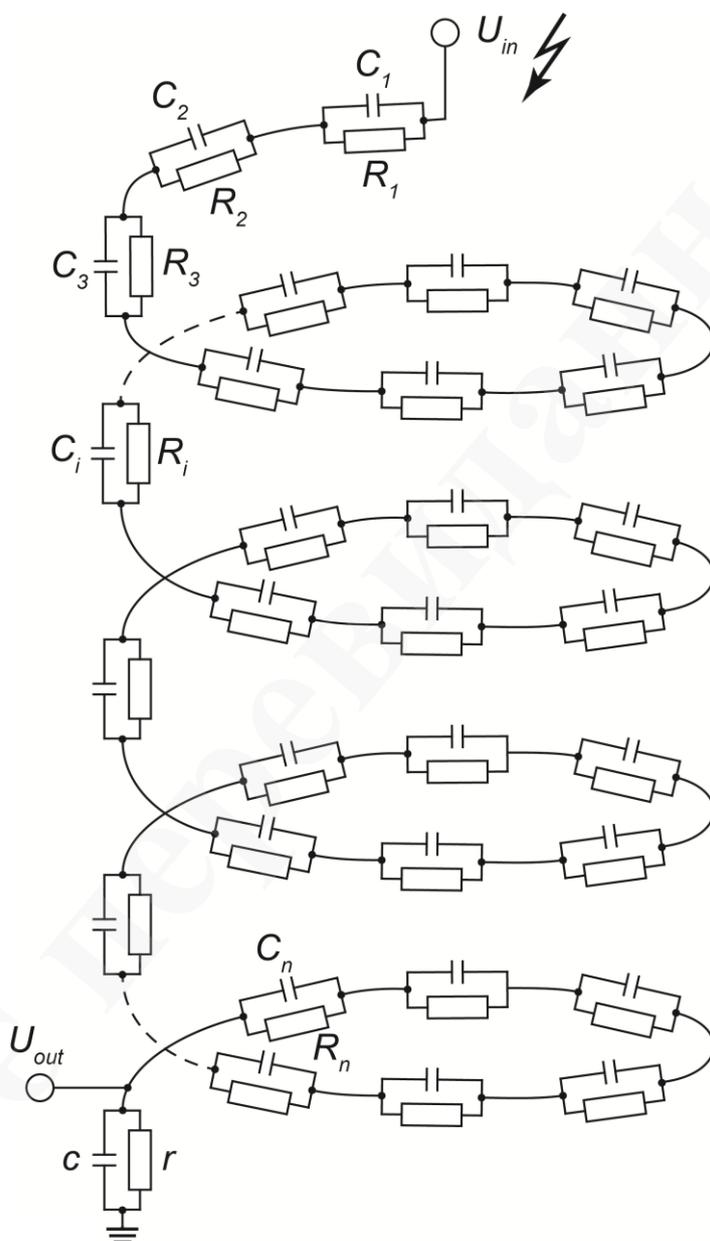


Рис. 1. Схема широкополосного ёмкостно-омического делителя напряжения с сосредоточенными элементами

На рис. 1: U_{in} – входное напряжение; U_{out} – выходное напряжение; C_1, C_2, \dots, C_n – ёмкостные элементы высоковольтного плеча; R_1, R_2, \dots, R_n – резистивные элементы высоковольтного плеча; C – ёмкость низковольтного плеча; r – омическое сопротивление низковольтного плеча.

Несомненно, тщательный подбор резисторов и конденсаторов, из которых состоит высоковольтное плечо, позволяет улучшить передаточные свойства делителя напряжения. Помимо того, что такой подход очень трудоемкий, даже после самого тщательного подбора элементов всегда будет присутствовать

некая неидентичность элементов. По этой причине нельзя считать, что делитель напряжения будет состоять из одинаковых элементов. Соответственно, все элементы делителя напряжения будут иметь различный температурный режим и различную зависимость от атмосферных условий (влажность, давление). В результате неидентичности элементов высоковольтного плеча коэффициент деления делителя напряжения помимо зависимости от частоты и амплитуды приложенного напряжения, приобретает также зависимость от температуры, влажности и давления окружающей среды. Это особенно характерно, поскольку современные делители напряжения представляют собой достаточно габаритные устройства с вертикальным расположением элементов. Однако, снижение отрицательного влияния неидентичности элементов высоковольтного плеча возможно путём внесения определённой корректировки в элементы низковольтного плеча делителя напряжения [6].

Согласно теории высоковольтных делителей напряжения [9], амплитудно-частотная характеристика делителя напряжения определяется выражением:

$$A(\gamma) = \frac{1}{K} A_1(\gamma), \% \quad (1)$$

где $A_1(\gamma)$ – нормированная амплитудно-частотная характеристика, которая в свою очередь определяется выражениями:

$$A_1(\gamma) = \frac{K}{K-1} \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{1 + \delta' \cdot \Theta}\right)^2}} \frac{1}{\sqrt{a^2 + \gamma^2 b^2}}, \quad (2)$$

$$a = \frac{1+f}{1+\gamma^2} + \frac{1}{K-1} \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{1 + \delta' \cdot \Theta}\right)^2}, \quad (3)$$

$$b = \frac{1+\delta}{1+\gamma^2} + \frac{1}{K-1} \frac{\frac{1}{1 + \delta' \cdot \Theta}}{1 + \left(\frac{\gamma}{1 + \delta' \cdot \Theta}\right)^2}. \quad (4)$$

В выражениях (1)–(4): K – номинальный коэффициент деления делителя напряжения; γ – безразмерный параметр угловой частоты ω . Параметр γ определяется следующими выражениями:

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

где R_0 и C_0 – усредненные значения, соответственно, резистивных и ёмкостных элементов высоковольтного плеча делителя напряжения; n – общее количество этих элементов.

В [6] показано, что неидентичность резистивных элементов высоковольтного плеча делителя напряжения является пренебрежимой по сравнению с неидентичностью ёмкостных элементов.

Тогда в выражении (3) функция f определяется соотношением:

$$f = \frac{\gamma^2}{1+\gamma^2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^2 (\gamma^2 (3+2\alpha_i) - 1)}{1+\gamma^2 (1+\alpha_i)^2}. \quad (5)$$

В свою очередь, в выражении (4) функция δ определяется выражением:

$$\delta = \frac{\gamma^2}{1+\gamma^2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^2 (\gamma^2 (1+\alpha_i) - 3 - \alpha_i)}{1+\gamma^2 (1+\alpha_i)^2}. \quad (6)$$

В двух последних выражениях α_i зависит от значений ёмкости высоковольтного плеча делителя напряжения (рис. 1) следующим образом:

$$\alpha_i = \frac{C_i - C_0}{C_0}.$$

Параметр δ' в (2)–(4) соответствует предельному значению δ (6) при $\gamma \rightarrow \infty$, то есть:

$$\delta' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i^2}{1+\alpha_i}.$$

Выбору элементов низковольтного плеча по обычным соотношениям:

$$r = \frac{nR_0}{K-1}, \quad c = \frac{C_0}{n} (K-1), \quad (7)$$

соответствует значение $\Theta = 0$ в формулах (2)–(4). При этом данный случай соответствует отсутствию корректировки низковольтного плеча делителя напряжения.

Значение $\Theta = 1$ в формулах (2)–(4) соответствует предельной корректировке ёмкости низковольтного плеча делителя напряжения, которая принимает значение:

$$c' = \frac{C_0}{n} \frac{K-1}{1+\delta'} \quad (8)$$

Как показывают предварительные расчёты, использование предельной корректировки ёмкости низковольтного плеча позволяет более чем в 2 раза снизить максимальное значение систематической погрешности делителя напряжения:

$$\Delta_A = (A_1 - 1) \cdot 100, \% \quad (9)$$

Однако, это максимальное значение Δ_A , в свою очередь, ещё, практически в 2 раза может быть уменьшено с помощью выбора оптимального значения параметра $0 < \Theta_{opt} < 1$. Задачей исследования является поиск этого оптимального значения Θ_{opt} , а также исследование зависимости и «минимизированной» погрешности делителя напряжения от ряда факторов.

Следует отметить, что оптимизированное значение ёмкости низковольтного плеча делителя напряжения может быть определено соотношением:

$$C_{opt} = \frac{C_0}{n} \frac{K-1}{1+\Theta_{opt}\delta'} \quad (10)$$

а его амплитудно-частотная характеристика определяется по выражениям (1)–(4) при подстановке $\Theta = \Theta_{opt}$.

В качестве модели неидентичности ёмкостных элементов высоковольтного плеча делителя напряжения было использовано симметричное «треугольное» распределение [6], при котором максимальные отклонения ёмкостей C_i от C_0 характеризуются соотношением:

$$C_i = C_0 (1 \pm \Delta_C), \quad (11)$$

где Δ_C – задаваемый в данном исследовании параметр, который может принимать значения в диапазоне от 0 до 0.2.

Все приведенные выше формулы формируют базу для проведения исследования. В целом, график систематической погрешности ёмкостно-омического делителя напряжения – это полимодальная функция, содержащая как положительный, так и отрицательный максимум. Задача исследования состоит в том, чтобы найти такое значение параметра Θ , при котором абсолютное значение положительного и отрицательного максимума будут одинаковыми. Такая корректировка низковольтного плеча называется оптимальной.

Эта задача была решена с помощью линейного программирования. Ключевой фрагмент программы для поиска оптимального значения параметра Θ приведен на рис. 2.

```

 $\Theta :=$ 
   $K_1 \leftarrow 10^1$ 
   $\max_A \leftarrow 1$ 
   $\min_A \leftarrow 0.1$ 
   $\Theta \leftarrow 0.63$ 
  while  $\frac{-\max_A}{\min_A} < 0.9999$ 
    for  $i \in 1 \dots 10000$ 
       $\gamma_i \leftarrow 0.01 \cdot i$ 
       $A_{res_i} \leftarrow (A(K_1, \gamma_i, \delta_s \cdot \Theta) - 1) \cdot 100$ 
       $\max_A \leftarrow A_{res_i}$ 
      for  $i \in 1 \dots 10000$ 
         $\max_A \leftarrow A_{res_i}$  if  $\max_A < A_{res_i}$ 
       $\min_A \leftarrow A_{res_i}$ 
      for  $i \in 1 \dots 10000$ 
         $\min_A \leftarrow A_{res_i}$  if  $\min_A > A_{res_i}$ 
       $\Theta \leftarrow \Theta + 1 \cdot 10^{-4}$ 
  return  $\Theta$ 

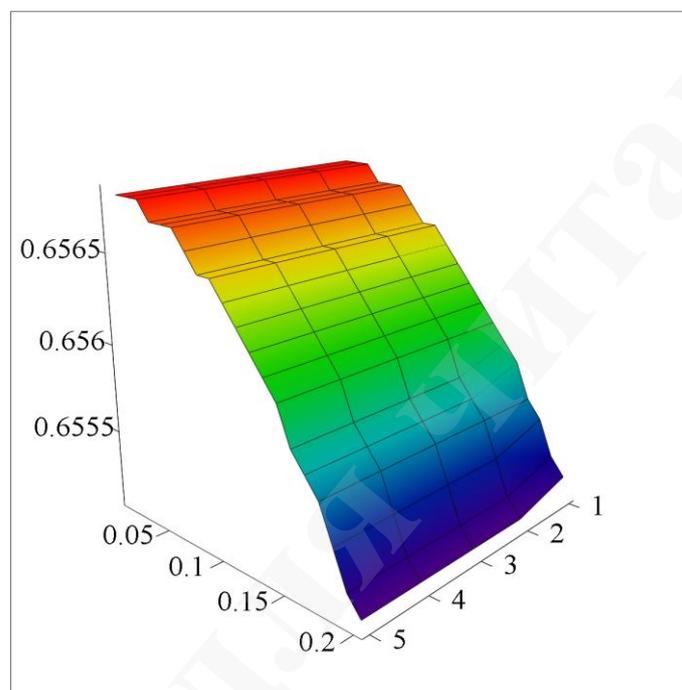
```

Рис. 2. Программа для оптимизации амплитудно-частотной характеристики

Программирование выполнено в программе Mathcad [10]. Программа работает следующим образом. Вначале программа проводит поиск максимума кривой систематической погрешности. Затем программа проводит поиск минимума кривой систематической погрешности. Затем программа сравнивает абсолютные значения максимума и минимума. Если эти значения отличаются, переменная Θ получает приращение, равное 0,0001 и цикл поиска повторяется. Цикл завершится, когда будет достигнуто равенство между абсолютным значением максимума и минимума искомой функции. Программа позволяет найти значение Θ_{opt} с точностью до четвертого знака после десятичной точки. Результаты расчетов с помощью этой программы приведены в следующем разделе.

3. Результаты исследований и обсуждение

Расчеты были выполнены для различных значений коэффициента деления делителя напряжения ($K=10^1; 10^2; 10^3; 10^4; 10^5$) и для различных значений максимального отклонения ёмкостей высоковольтного плеча от среднего значения ($\Delta_C=0.01\dots 0.20$). При таких условиях были получены графики поверхностей переменной Θ_{opt} (рис. 3) и систематической погрешности Δ_A (рис. 4).



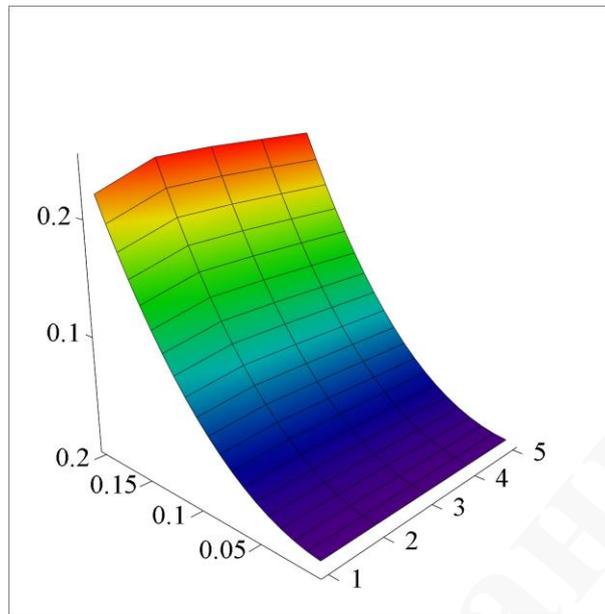
($K, \Delta_C, \Theta_{opt}$)

Рис. 3. Трёхмерный график переменной Θ_{opt}

На рис. 3 и рис. 4 коэффициенты деления K делителя напряжения приведены в логарифмическом масштабе (по оси отложены показатели степени коэффициента деления).

График на рис. 3 показывает, какое значение должна иметь переменная Θ_{opt} , чтобы при заданных K и Δ_C абсолютные значения максимума и минимума систематической погрешности были одинаковы.

График на рис. 4 показывает, что с увеличением значения параметра Δ_C , практически независимо от значения K коэффициента деления делителя напряжения, значение амплитудной погрешности Δ_A возрастает по параболической зависимости от Δ_C . Графики на рис. 3 и рис. 4 обобщают огромный массив данных вычислений.



(K, Δ_C, Δ_A)

Рис. 4. Трёхмерный график систематической погрешности емкостно-омического делителя напряжения Δ_A (%)

Покажем более наглядно один из результатов оптимизации амплитудно-частотной характеристики делителя напряжения на рис. 5. Этот график показывает характер зависимости систематической погрешности Δ_A (%) от условного параметра γ . Форма кривой, практически, одинакова во всём исследуемом диапазоне изменения параметров Δ_C , K , Θ_{opt} , отличаются только абсолютные значения максимума и минимума.

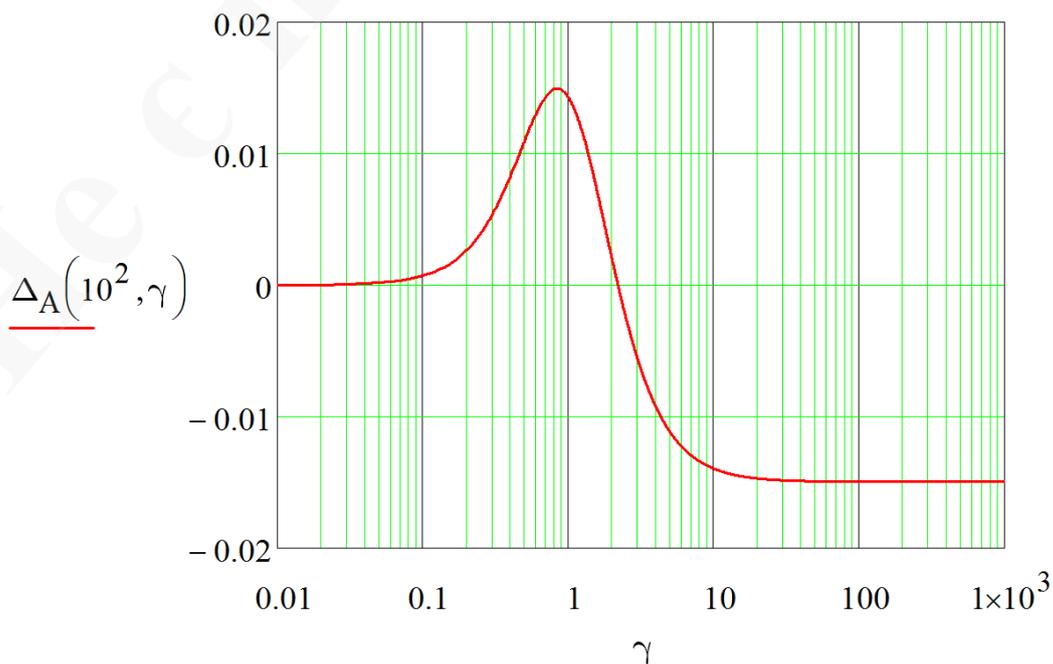


Рис. 5. Пример графика систематической погрешности делителя Δ_A (%) после оптимизации путем корректировки низковольтного плеча

Функциональная зависимость на рис. 5 получена для $\Delta_C = 0.05$, $K = 10^2$. С помощью приведенной выше программы поиска получено значение $\Theta_{opt} = 0.656$, при котором абсолютные значения максимума и минимума амплитудной погрешности были одинаковы и составляют 0.01495 %.

Развитие теории высоковольтных делителей напряжения является перспективным в связи с тем, что эта категория высоковольтных масштабных преобразователей имеет возможности стать обязательной для определения показателей качества электрической энергии непосредственно на высоком напряжении. Одним из катализаторов этого может стать интенсивное развитие концепции Smart Grid, которая требует новых, более совершенных средств мониторинга качества электроэнергии [11, 12]. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования, направленные на снижение погрешности широкополосных делителей напряжения являются важными.

4. Выводы

В результате проведенных исследований показана возможность оптимизации амплитудно-частотной характеристики широкополосного ёмкостно-омического делителя напряжения путём варьирования значения ёмкости его низковольтного плеча.

Параметр оптимизации значения ёмкости низковольтного плеча делителя напряжения во всём диапазоне исследуемых параметров $K=10^1-10^5$, $\Delta_C = 0-0.2$ может быть охарактеризован постоянным значением $\Theta_{opt} = 0.656$.

Зависимость систематической погрешности оптимизированного делителя напряжения от безразмерного параметра частоты γ является универсальной по форме с отличием максимальных предельных значений Δ_A .

Для значений масштабного коэффициента делителей напряжения $1 < K < 10$ необходимы дополнительные исследования оптимизации амплитудно-частотных характеристик.

Литература

1. Harada, T., Wakimoto, T., Sato, S., Saeki, M. (2000). Development of Japan's National Standard Class 500 kV Lightning Impulse Voltage Divider. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, 3, 1564–1568. doi: <http://doi.org/10.1109/pesw.2000.847575>
2. Prochazka, R., Hlavacek, J., Knenicky, M., Mahmoud, R. (2016). Determination of Frequency Characteristics of High Voltage Dividers in Frequency Domain. *17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 1–4. doi: <http://doi.org/10.1109/epe.2016.7521821>
3. Muscas, C. (2010). Power quality monitoring in modern electric distribution systems. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13 (5), 19–27. doi: <http://doi.org/10.1109/mim.2010.5585070>
4. Pawelek, R., Wasiak, I. (2014). Comparative measurements of voltage harmonics in transmission grid of 400 kV. *2014 16th International Conference on*

Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 606–610. doi: <http://doi.org/10.1109/ichqp.2014.6842763>

5. Blajszczak, G. (2011). Resistive Voltage Divider for Higher Harmonics Measurement in 400 kV Network. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 1–4. doi: <http://doi.org/10.1109/epqu.2011.6128953>

6. Anokhin, Y. L., Brzhezitsky, V. O., Haran, Y. O., Masliuchenko, I. M., Protsenko, O. P., Trotsenko, Y. O. (2017). Application of high voltage dividers for power quality indices measurement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 6, 53–59. doi: <http://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.6.08>

7. Trotsenko, Y., Brzhezitsky, V., Protsenko, O., Haran, Y., Chumack, V. (2018). Calculation of High Voltage Divider Accuracy Using Duhamel's Integral. *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 213–216. doi: <http://doi.org/10.1109/mmet.2018.8460314>

8. Trotsenko, Y., Brzhezitsky, V., Protsenko, O., Haran, Y. (2019). Experimental Laboratory Equipped with Voltage Dividers for Power Quality Monitoring. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 270–273. doi: <http://doi.org/10.1109/mees.2019.8896471>

9. Brzhezytskyi, V. O., Isakova, A. V., Rudakov, V. V.; Brzhezytskyi V. O., Mykhailov, V. M. (Eds.) (2005). *Tekhnika i elektrofizyka vysokykh napruh*. Kharkiv: NTU "KhPI"-Tornado, 930.

10. Makarov, E. G. (2005). *Inzhenernye raschety v Mathcad*. Saint Petersburg: Piter, 448.

11. Gharavi, H., Ghafurian, R. (2011). Smart Grid: The Electric Energy System of the Future. *Proceedings of the IEEE*, 99 (6), 917–921. doi: <http://doi.org/10.1109/jproc.2011.2124210>

12. Rahmatian, F. (2010). High-Voltage Current and Voltage Sensors for a Smarter Transmission Grid and Their Use in Live-Line Testing and Calibration. *IEEE PES General Meeting*, 1–3. doi: <http://doi.org/10.1109/pes.2010.5590212>