

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЕМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Г.И. Волович, С.Н. Мунтьянов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

При проектировании измерительных преобразователей, имеющих широкий интервал рабочих температур, требуется оценивать температурную нестабильность коэффициента передачи. Для высоковольтных преобразователей по ГОСТ МЭК Р 60044-7-2010 установлена методика оценки температурной нестабильности. Данная оценка предполагает необходимость экспериментальной проверки метрологических характеристик преобразователя по крайним точкам диапазона рабочих температур. Однако исследуемая погрешность является сложной функцией, которая может иметь точки экстремума в исследуемом диапазоне, что приводит к неправильной оценке. В статье рассматривается оценка температурной нестабильности емкостного масштабирующего преобразователя напряжения методом Монте-Карло. В статье приведены эмпирические зависимости емкости пленочных конденсаторов от температуры. Получены зависимости дополнительных погрешностей от температуры. Получена оценка зависимости дополнительной погрешности преобразователя от разности температур плеч делителей. Также оценена дополнительная погрешность преобразователя.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, температурная погрешность, высоковольтный делитель напряжения.

Введение

Высоковольтные измерительные преобразователи тока и напряжения, предназначенные для измерений в высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения представляют собой устройства, эксплуатируемые в широком диапазоне климатических условий, что приводит к необходимости оценки дополнительных составляющих погрешности преобразователя. Температурная стабильность коэффициента передачи для подобных измерительных преобразователей является одной из важнейших характеристик.

При разработке высоковольтного делителя напряжения необходимо иметь возможность оценки температурной погрешности измерительного преобразователя на этапе проектирования.

Результаты данной оценки позволяют определиться с конструкцией делителя и выбрать входящие в него компоненты на этапе проектирования с целью минимизации температурной погрешности.

Для анализа влияния температуры на коэффициент передачи емкостного делителя напряжения использовался метод Монте-Карло.

1. Математическая постановка задачи

При изменении температуры изменяется емкость конденсаторов, входящих в состав высоковольтного делителя напряжения. Зависимость емкости от температуры, обычно характеризуется температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). ТКЕ – относительное изменение емкости при изменении температуры окружающей. ТКЕ определяется по формуле

$$\text{ТКЕ} = \frac{\Delta C}{C_{н.у} \Delta T},$$

где ΔC – изменение емкости, вызванное изменением температуры на ΔT . Таким образом, зависимость емкости от температуры может быть выражена линейной функцией

$$C(T) = C_{н.у} (1 + \text{ТКЕ} \cdot \Delta T),$$

где ΔT – изменение температуры относительно нормальных условий, $C_{н.у}$ – емкость при нормальных условиях. ТКЕ применяется для характеристики конденсаторов с практически линейной

зависимостью емкости от температуры. Однако ТКЕ указывается в спецификациях не для всех типов конденсаторов.

Для конденсаторов, имеющих нелинейную зависимость емкости от температуры, и для конденсаторов с большими изменениями емкости от воздействия температуры окружающей среды в спецификациях нормируются относительное изменение емкости в рабочем диапазоне температур или в виде графика зависимости емкости от температуры.

ТКЕ конденсатора очень сильно зависит от материала диэлектрика между обкладками. Изменение толщины диэлектрика, зависимость диэлектрической проницаемости от температуры, изменение площади обкладок, вызывают изменение емкости конденсатора.

Рассматривается набор конденсаторов Ерсос МКР – В32656 номиналом 220 нФ на напряжение до 2 кВ. Производитель указывает, что изменение емкости, вызванное изменением температуры, у данных конденсаторов, не будет превышать 5 % при изменении температуры от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

Гистограмма распределения ТКЕ выборки конденсаторов представлена на рис. 1. Таким образом, емкости конденсаторов одного типа представляют собой случайные функции температуры.

Схема рассмотренного высоковольтного емкостного делителя напряжения приведена на рис. 2.

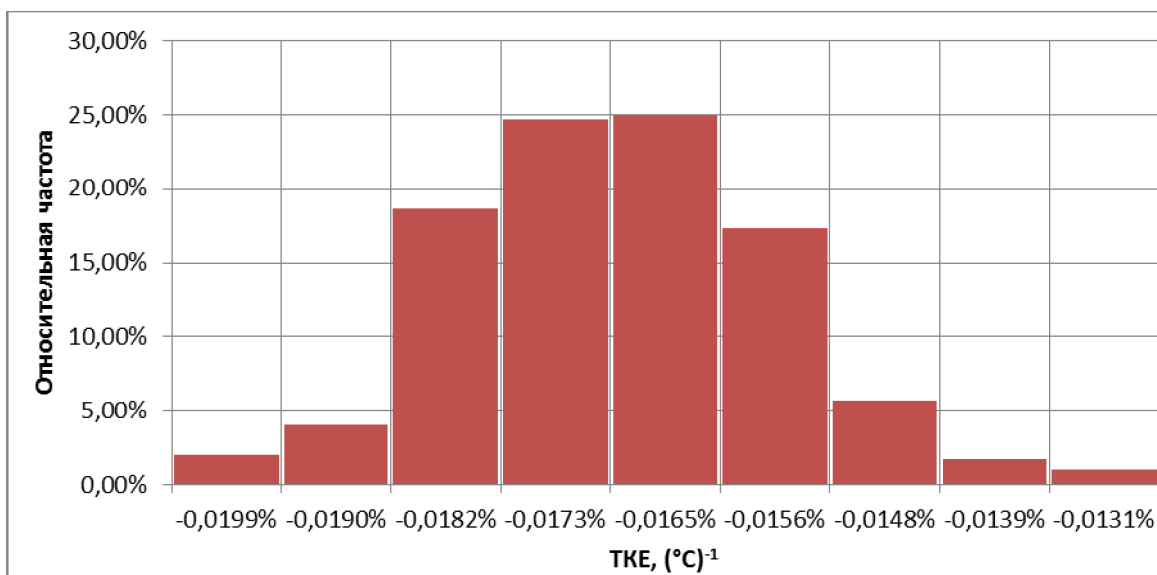


Рис. 1. Гистограмма распределения температурного коэффициента емкости конденсаторов

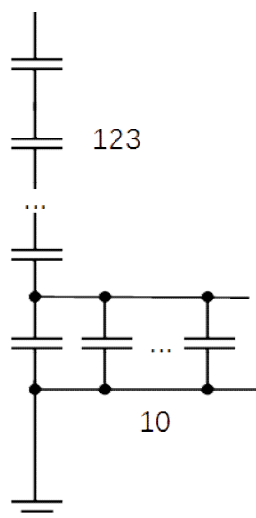


Рис. 2. Принципиальная схема делителя

Краткие сообщения

Коэффициент передачи делителя, представленного на данном рисунке, определим как

$$K = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}}, \quad (1)$$

где

$$C_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_{1,i}}}, \quad C_2 = \sum_{i=1}^m C_{2,i},$$

где m – число конденсаторов в низковольтном плече; n – число конденсаторов в высоковольтном плече.

Так как коэффициент деления будет откалиброван при температуре соответствующей нормальным условиям, то ошибка, вызванная температурной нестабильностью емкости, будет определяться как влияние изменения номиналов емкости при изменении температуры. Определим данное значение как

$$\delta_T = \frac{K_{T_0} - K_T}{K_{T_0}} \cdot 100 \%,$$

Эмпирическая зависимость емкости от температуры при исследовании 300 конденсаторов при оценке степени полиномиальной модели методом группового учета аргументов имеет линейную зависимость, что позволяет рассматривать зависимость коэффициента передачи от температуры как

$$K(T) = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^m (k_{2,j}T + C_{2,j,0}^{\circ\text{C}}) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_{1,i}T + C_{1,i,0}^{\circ\text{C}}} \right)}.$$

Распишем данное выражение

$$K(T) = \frac{\prod_{i=1}^n (k_{1,i}T + C_{1,i,0}^{\circ\text{C}})}{\prod_{j=1}^m (k_{1,j}T + C_{1,j,0}^{\circ\text{C}}) + \sum_{k=1}^m (k_{2,k}T + C_{2,k,0}^{\circ\text{C}}) \sum_{h=1}^n \left(\prod_{l=1, l \neq h}^n (k_{1,l}T + C_{1,l,0}^{\circ\text{C}}) \right)}.$$

Таким образом, получаем, что данная зависимость будет представлять функцию вида (2):

$$K(T) = \frac{\sum_{k=0}^n (a_k T^k)}{\sum_{j=0}^n (b_j T^j)}. \quad (2)$$

Для определения наличия точек экстремума на интересующем нас температурном диапазоне был использован метод Монте-Карло.

2. Метод решения задачи

Для оценки данной погрешности преобразователя в силу сложной стохастической зависимости в МИ 2083-90 рекомендуется использовать метод приведения статистических характеристик параметров к выходному значению функции преобразования [2]. Однако данный метод неэффективен при сложной зависимости параметров, так как при каждой вычислительной операции объемы итоговых выборок и время вычисления увеличиваются.

Метод статистических испытаний Монте-Карло [3] лишен подобных недостатков. Метод Монте-Карло относится к классу численных методов, моделирующих псевдослучайные числовые последовательности с характеристиками известного закона распределения измеряемого параметра [4].

Метод Монте-Карло хорошо подходит в качестве замены стандартному методу приведения, так как за счет уменьшения размерности исходной выборки значений при сохранении закона

распределения влияющих параметров уменьшается время расчета статистических параметров интересующей нас случайной величины. При этом точность метода будет определяться погрешностью полученной относительной частоты. Точность моделирования при исследуемом количестве точек 100 000 не превышает 0,01 % [4].

3. Анализ полученных результатов

При моделировании была получена зависимость размаха значений температурной погрешности коэффициента передачи емкостного делителя напряжения от температуры. Данная зависимость приведена на рис. 3.

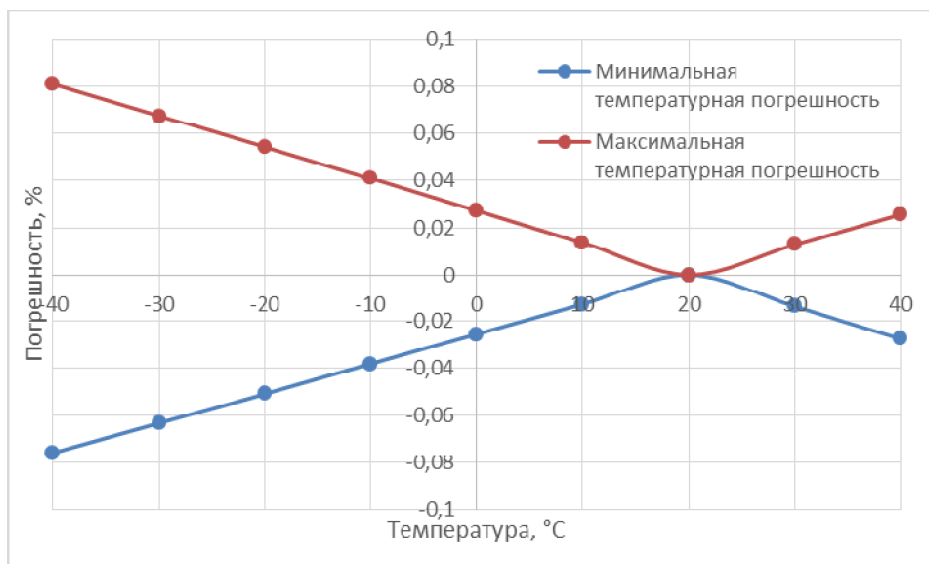


Рис. 3. Зависимость размаха значений температурной погрешности от температуры

Полигоны распределений полученных погрешностей при температурах от -40 до 40 показаны на рис. 4.

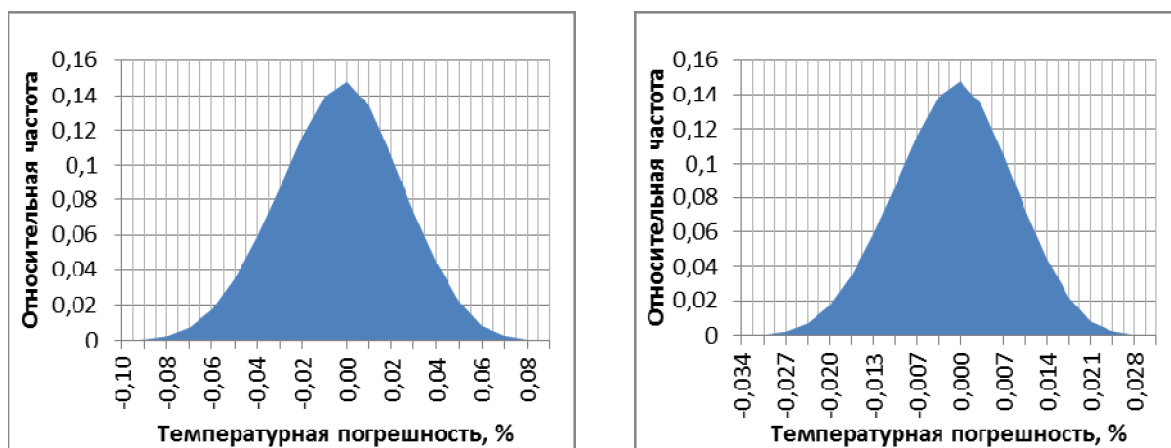


Рис. 4. Полигоны распределения относительной температурной погрешности K при изменении температуры от 20 до -40 °C (слева) и от 20 до 40 °C (справа) при условии равной температуры плеч

Было проанализировано поведение коэффициента передачи (1, 2) на интересующем нас участке температур. Данная зависимость не имела точек экстремума для всех случайно сгенерированных комбинаций, что позволяет оценивать температурную погрешность для граничных точек изменения температуры.

Таким образом, получено, что максимальная температурная ошибка составит 0,0014 % при отклонении температуры на каждые 10 °C.

Краткие сообщения

Однако следует заметить, что при нормальном режиме использования данного вида преобразователей температура ЛЭП примерно на три градуса выше температуры окружающей среды, и это вызовет перепад температур в высоковольтном и низковольтном плечах делителя [5]. Данное влияние можно оценить, приняв температуру равномерной в каждом из плеч. Распределения погрешностей при температуре низковольтного плеча на 3 градуса выше температуры высоковольтного плеча при граничных рабочих температурах представлены на рис. 5.

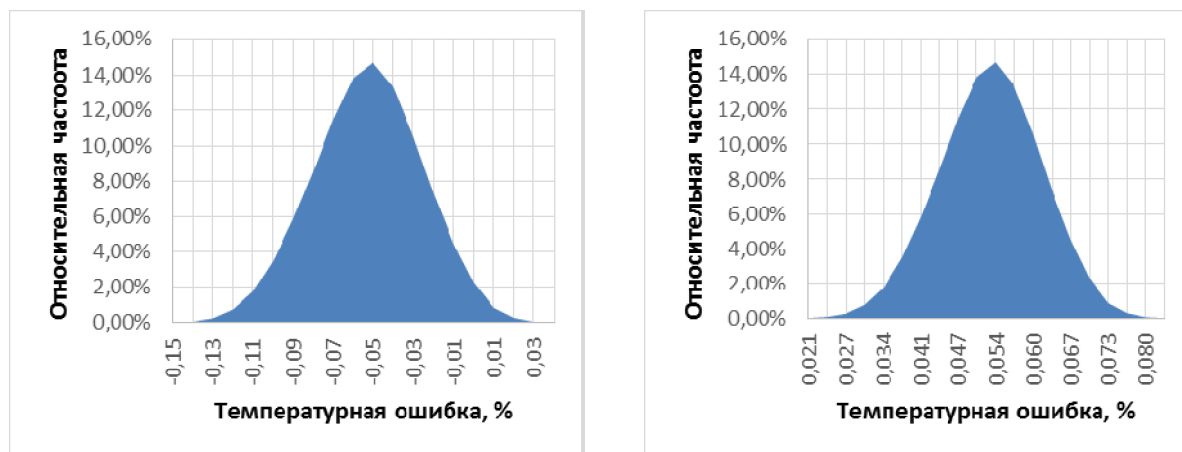


Рис. 5. Полигоны распределений температурной погрешности при нагреве низковольтного плеча на 3 градуса выше температуры нагрева низковольтного, для температур окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (слева) и $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (справа)

При наибольшем отклонении температуры от нормальных условий наблюдается большее влияние разности температур плеч на ошибку. Зависимость отклонения от разности температур на рис. 6.

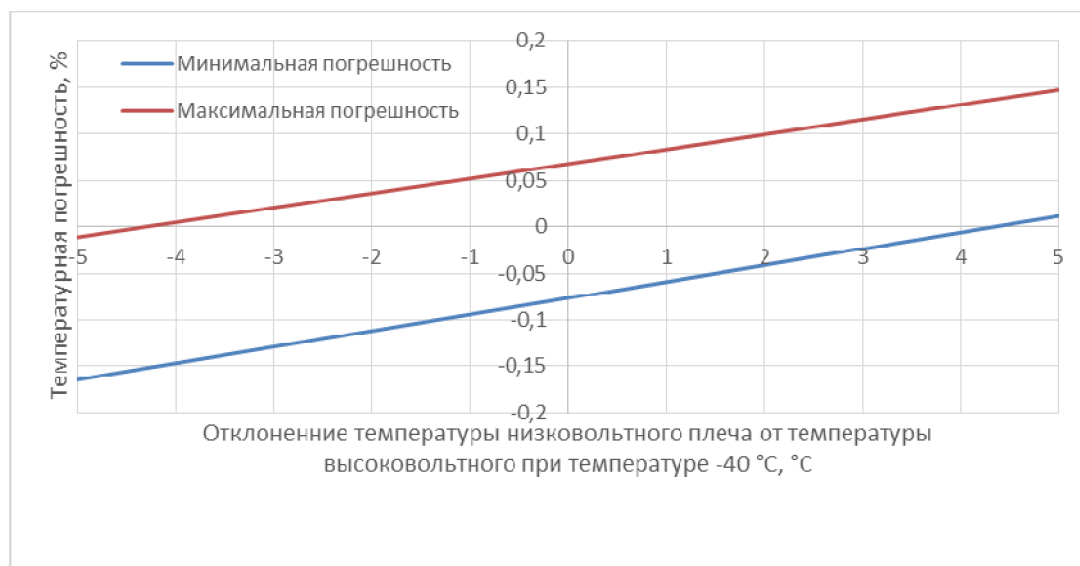


Рис. 6. Зависимость температурной погрешности при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ от разности температур плеч делителя

Таким образом, видно, что погрешность будет зависеть от распределения температуры между компонентами преобразователя. При расчете получена оценка наиболее критичного случая: когда температура всех конденсаторов высоковольтного плеча отличается от температуры низковольтного плеча на фиксированную величину.

Выводы

Проверена возможность оценки температурной нестабильности емкостного масштабирующего преобразователя напряжения с помощью метода Монте-Карло.

По результатам численного эксперимента получены полигоны распределения температурной погрешности высоковольтного емкостного делителя напряжения с погрешностью определения частоты вхождения в каждый интервал 0,01 %. Построены зависимости при различных температурах плеч делителя. Полученные значения говорят о необходимости использования методов уменьшения погрешностей.

Литература

1. *Film capacitors for industrial applications*. – Электрон. текстовые данные (2.83мб). – <http://en.tdk.eu/blob/173546/download/5/film-capacitors-for-industrial-applications.pdf> (дата обращения: 18.10.2015).

2. МИ 2083–90. Методические указания. ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 12 с.

3. Бусленко, Н.П. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах / Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. – 228 с.

4. Вентцель, Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. – М.: Совет. радио, 1972. – 552 с.

5. Электрические системы. Электрические сети: учеб. для электроэнергет. спец. вузов / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.; под ред. В.А. Веникова В.А. Строева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, профессор кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; g_volovich@mail.ru.

Мунтьянов Сергей Николаевич, аспирант кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; muntyanovs@gmail.com.

Поступила в редакцию 20 марта 2016 г.

DOI: 10.14529/ctcr160317

**EVALUATION OF TEMPERATURE INSTABILITY
OF HIGH-VOLTAGE CAPACITIVE DIVIDER**

G.I. Volovich, g_volovich@mail.ru,

S.N. Munt'yanov, muntyanovs@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

While designing the measurement transducer, that has wide range of working temperatures, it is important to evaluate instability of temperature coefficient of transmission. For high-voltage transformers according to GOST R IEC 60044-7 established method of estimating temperature instability. This estimate suggests experimental verification of metrological characteristics of the converter at the extremes of the operating temperature range. However, the error that we explore is a complex function. This function may include an extremum in the tested range, resulting in an incorrect evaluation. This article discusses the evaluation of thermal instability by Monte-Carlo method. Error estimation was produced for different temperatures. The dependences of additional errors from the temperature are obtained.

Keywords: Monte Carlo method, temperature instability, high-voltage divider.

References

1. Film Capacitors for Industrial Applications. Available at: <http://en.tdk.eu/blob/173546/download/5/film-capacitors-for-industrial-applications.pdf> (accessed 18.10.2015).
2. *MI 2083–90. Metodicheskie ukazaniya. GSI. Izmereniya kosvennye. Opredelenie rezul'tatov izmereniy i otsenivanie ikh pogreshnostey* [MI 2083–90. Methodical Instructions. GSI. Indirect Measurements. Determination of Measurement Results and Estimation of their Errors]. Moscow, [Standards Publ. House], 1991. 5 p.
3. Buslenko N.P., Shreyder Yu.A. *Metod statisticheskikh ispytaniy (Monte-Karlo) i ego realizatsiya na tsifrovyykh vychislitel'nykh mashinakh* [The Method of Statistical Tests (Monte Carlo) and its Realization on Digital Computers]. Moscow, [State Publishing House of Physical and Mathematical Literature], 1961. 228 p.
4. Ventcel E.S. *Issledovanie operatsiy* [Operations Reserach]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1972. 552 p.
5. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. and others. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti: Ucheb. dlya elektroenerg. spets. vuzov* [Electrical Systems. Electrical Networks. Textbook]. Moscow, [High School Publ.], 1998. 511 p.

Received 20 March 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Волович, Г.И. Оценка температурной нестабильности высоковольтного емкостного делителя напряжения / Г.И. Волович, С.Н. Мунтянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 152–158. DOI: 10.14529/ctcr160317

FOR CITATION

Volovich G.I., Munt'yanov S.N. Evaluation of Temperature Instability of High-Voltage Capacitive Divider. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 152–158. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr160317