

К. ф.-м. н. О. В. ІВАНЧЕНКО, д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВАРИСТОРНО-ПОЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Досліджено вплив температури навколишнього середовища на електричні характеристики комбінованої двошарової структури на основі варисторної кераміки та полімерних позисторних нанокompatитів з вуглецевим наповнювачем, яка використовується як обмежувач вхідної напруги. Встановлено, що у разі її підвищення вихідна напруга та температура структури в діапазоні обмеження змінюються незначно, а струм та потужність розсіювання шарів істотно знижуються.

Ключові слова: варисторна кераміка, полімерний позисторний нанокompatит, обмежувач напруги, електричні характеристики, температура.

Використання комбінованої двошарової структури на основі варисторної кераміки та полімерних позисторних нанокompatитів з вуглецевим наповнювачем, що знаходяться у тепловому контакті, останнім часом розглядається як один з перспективних напрямків розв'язання проблеми захисту електричних кіл від тривалої та постійної перенапруги [1, 2]. Особливий інтерес такі обмежувачі напруги представляють для розробки засобів захисту від електричних і теплових навантажень у фотоелектричних системах сонячних батарей [3, 4].

Слід зазначити, що найвідомішими пристроями захисту від перенапруги на основі неоднорідних діелектриків є керамічні металооксидні варистори. Їхньою основною функціональною властивістю є нелінійність вольт-амперної характеристики (ВАХ), що дозволяє вирішувати завдання захисту електричних кіл від імпульсної перенапруги практично будь-якого діапазону (від небажаних кидків напруги в електронних пристроях до грозових розрядів) [5—7]. Однак у разі виникнення перенапруги тривалої або майже постійної дії застосування таких пристроїв захисту є проблематичним через їх значне нагрівання, що призводить до деградації їхніх нелінійних ВАХ і насамкінець до руйнування самих варисторів [8, 9].

Компонентами такої комбінованої структури є шари з металооксидної варисторної кераміки та нанокompatита, що використовуються в запобіжниках РРТС технології PolySwitch, що знаходяться в тепловому контакті. Елементи типу PolySwitch, які називають також самовідновлювальними запобіжниками, або запобіжниками РРТС [4, 10, 11], виготовляють на основі композитів з нанорозмірними вуглецеви-

ми наповнювачами і, як правило, поліетиленової матриці. В таких композитах відбувається різке, на кілька порядків, збільшення електричного опору при нагріванні до температури фазового переходу T_{cp} , а після зниження температури — повернення до вихідного високопровідного стану.

Варисторний шар комбінованих структур підключається паралельно до об'єкта захисту, а позисторний — послідовно (рис. 1). Основною функціональною властивістю такого пристрою є згадане вище різке збільшення електричного опору шару позисторного нанокompatита в процесі передачі теплової енергії від розігрітого перенапрягою варисторного шару, що знаходиться в тепловому контакті з ним. В результаті відбувається перерозподіл вхідної перенапруги між шарами, що забезпечує обмеження вихідної напруги на варисторному шарі та, відповідно, включеному паралельно йому навантаженні.

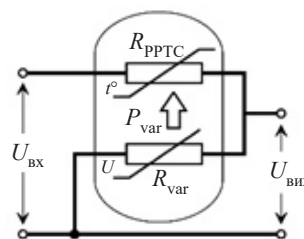


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема обмежувача перенапруги на основі двошарової варисторно-позисторної структури:

$U_{BX}, U_{BИX}$ — вхідна та вихідна напруга; $R_{var}, R_{PPТС}$ — електричний опір варисторного та позисторного шарів; P_{var} — тепла потужність, що передається позистору від варистора за наявності перенапруги U_{BX}

Для ефективного технічного застосування досліджених комбінованих електротеплових пристроїв необхідна детальна інформація про їхню поведінку в різних умовах, зокрема в різних температурних режимах. У зв'язку з цим одним з актуальних завдань є вивчення впливу факторів, пов'язаних з навколишнім середовищем, на їхні електричні характеристики.

Метою роботи було дослідження впливу температури навколишнього середовища на електричні характеристики, потужність розсіювання та температуру позисторного шару обмежувача напруги на основі двошарової варисторно-позисторної структури.

Зразки та методика експерименту

Досліджувалися зразки обмежувачів напруги, основою робочого елемента яких (шар діаметром 14,5 мм товщиною 3 мм) був робочий елемент серійного варистора VCR-14D180L (диск діаметром 14,5 мм, товщиною 1,5 мм; класифікаційна напруга 18 В) [12], другим шаром був запобіжник PPTC типу FRX110-60F (шар діаметром 11 мм, товщиною 1 мм; опір елемента у провідному стані 0,38 Ом; температура спрацювання 125°C) [13] на основі полімерного нанокompозита з вуглецевим наповнювачем. Тепловий контакт між шарами забезпечувався використанням кремнієвої теплопровідної пасти КПТ-8 [14].

Вхідна напруга $U_{вх}$ подавалася від стандартного регульованого джерела напруги та прикла-

далася до послідовно з'єднаних шарів структури. Вимірювання значень струму I , напруги вхідної $U_{вх}$ та вихідної (напруги на варисторному шарі) $U_{вих}$ проводилися промисловими амперметрами та вольтметрами. Обмежувач напруги розміщували у термостаті, який дозволяв змінювати температуру. Вимірювання проводилися після встановлення заданої температури всередині термостата, яка відповідала температурі навколишнього середовища для досліджуваного зразка. Температура структури T та навколишнього середовища T_0 фіксувалася за допомогою термопар.

Результати експериментальних досліджень

Залежності напруги на виході досліджуваної структури від прикладеної вхідної напруги в режимі холостого ходу представлені на рис. 2, а. Як видно, зі збільшенням вхідної напруги вихідна напруга структури має тенденцію до обмеження. Вплив температури навколишнього середовища на абсолютну величину обмеженої вихідної напруги є незначним (не перевищує 10% в дослідженому діапазоні температури T_0). Цей ефект супроводжується підвищенням температури структури T до значення, близького до температури $T_{тр}$ фазового переходу «провідник — ізолятор», що спостерігається в нанокompозитах з додатними коефіцієнтами температурного опору (рис. 2, б).

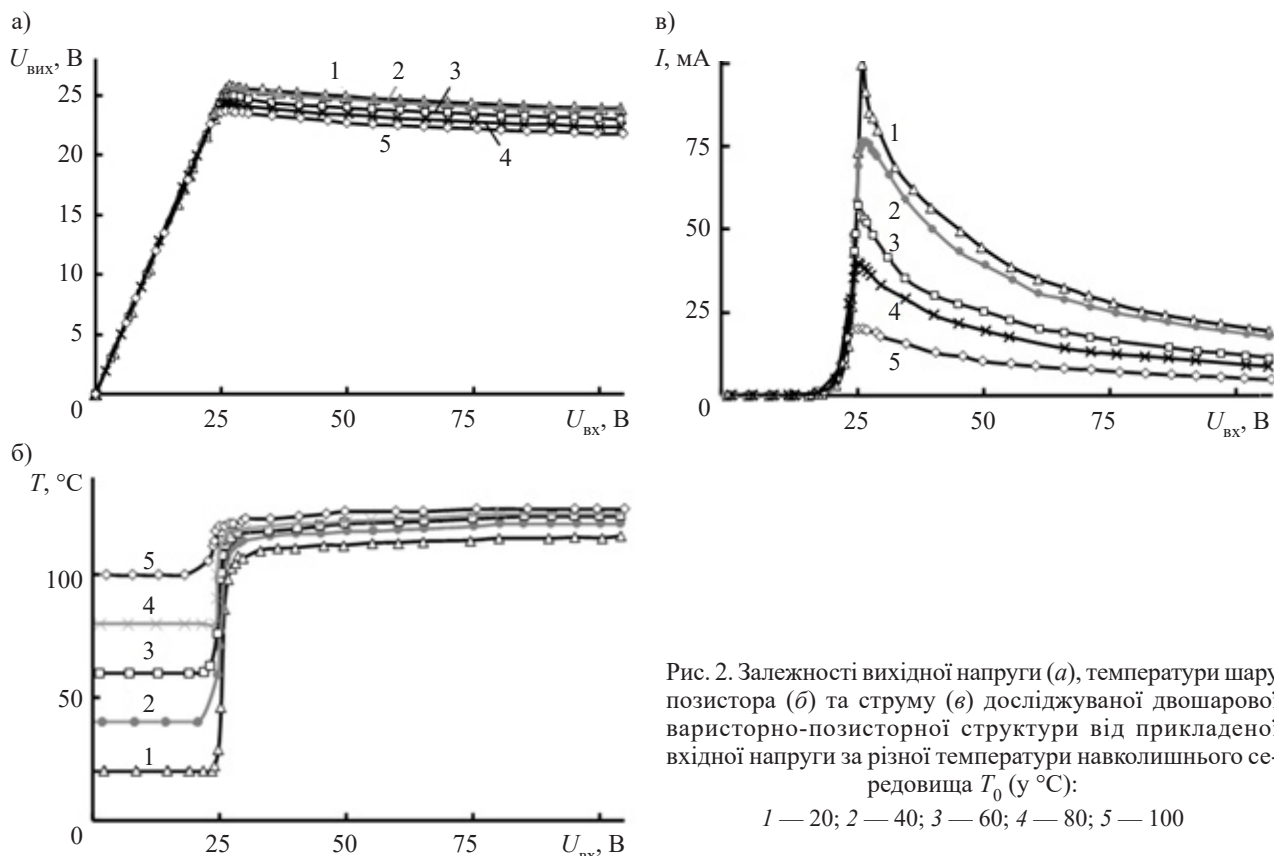


Рис. 2. Залежності вихідної напруги (а), температури шару позистора (б) та струму (в) досліджуваної двошарової варисторно-позисторної структури від прикладеної вхідної напруги за різної температури навколишнього середовища T_0 (у °С):

1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80; 5 — 100

Підвищення температури навколишнього середовища T_0 веде до незначного збільшення температури позисторного шару структури в діапазоні вихідної напруги, де реалізується процес її обмеження. Температура варисторного шару дещо перевищувала температуру позистора, але її залежність від $U_{\text{вх}}$ була аналогічною залежності для позистора (див. рис. 2, б).

На рис. 2, в представлені вхідні характеристики досліджених структур. Як видно, вони відповідають типовим вольт-амперним характеристикам позисторів [15, 16]. Основна функція варистора — обмеження імпульсу перенапруги — реалізується тільки впродовж короткого проміжку часу на початку її дії, коли варисторний елемент нагріває структуру до температури фазового переходу позисторного елемента, і далі він вже виконує функцію тільки підігрівача. Після перемикання позисторного елемента в низькопровідний стан після досягнення $T_{\text{тр}}$ струм структури зменшується до величини, достатньої для його утримання в цьому стані [13].

Таким чином, зі збільшенням напруги $U_{\text{вх}}$ струм I , що протікає через досліджувану комбіновану структуру, збільшується та проходить через максимум (коли температура структури наближається до $T_{\text{тр}}$, що відповідає зазначеному раніше фазовому переходу). Надалі струм, що протікає через структуру, зменшується через збільшення опору нанокон-

позитного позисторного шару. Згідно з даними на рис. 2, в підвищення температури навколишнього середовища T_0 обумовлює значне зменшення величини струму I .

На рис. 3 представлені відповідні залежності електричної потужності, яка розсіюється всією структурою та її складовими, тобто шарами варисторної кераміки та позисторного полімерного нанокompозита.

На початку збільшення вхідної напруги електрична потужність розсіюється в основному на варисторному шарі, який нагрівається сам і нагріває позисторний шар. Після переходу позисторного шару у високоомний стан при $T_{\text{тр}}$ відбувається перерозподіл вхідної напруги та розсіюваної електричної потужності у бік збільшення її позисторної складової.

Можна зауважити, що після переходу двошарової варисторно-позисторної структури у режим обмеження вхідної напруги сумарна її потужність розсіювання виходить на деяке постійне значення, яке перестає залежати від напруги, що прикладається, у досліджених межах. Це значення потужності може бути використане при підборі варисторних та інших елементів електротеплових обмежувачів напруги розглянутого типу. Підвищення температури навколишнього середовища призводить до зменшення додаткової електричної потужності, необхідної для досягнення позисторним шаром температури фазового переходу.

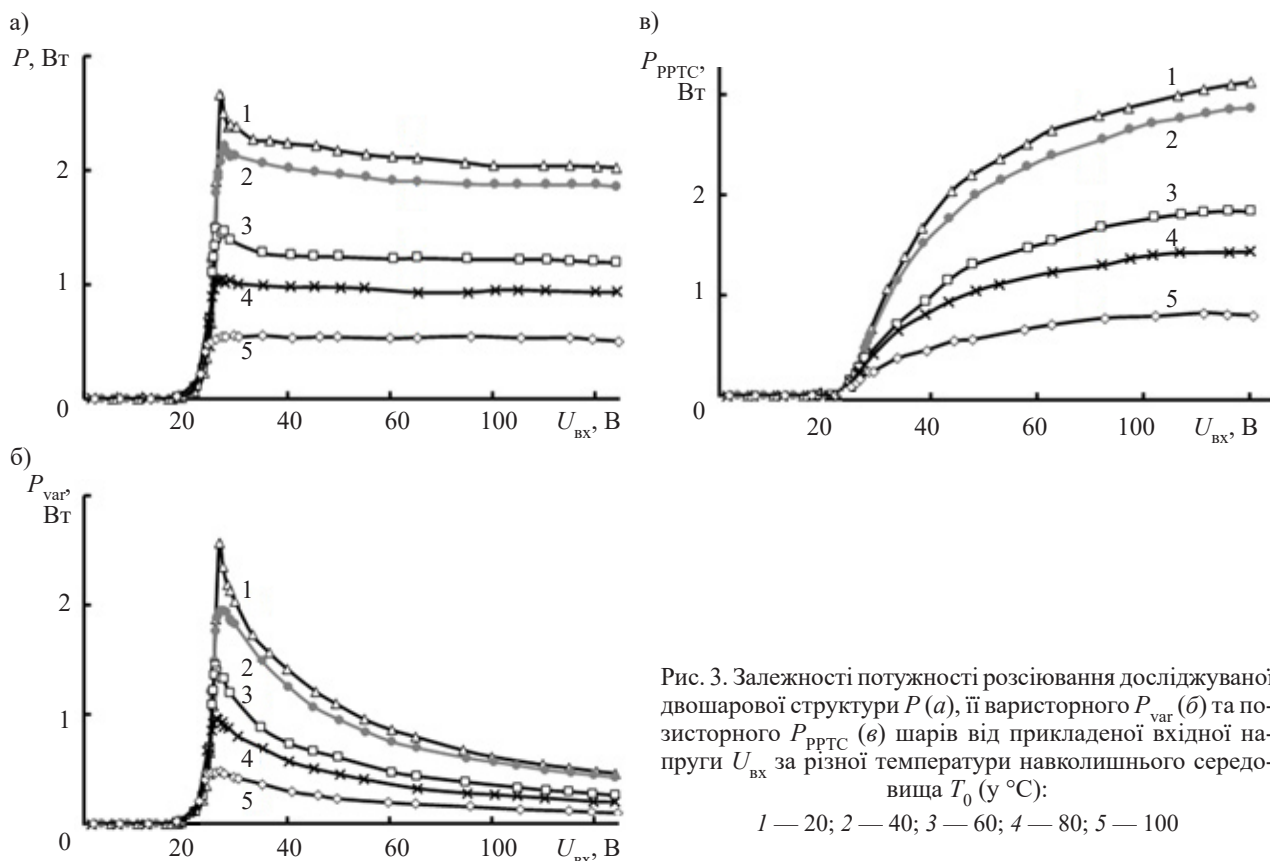


Рис. 3. Залежності потужності розсіювання досліджуваної двошарової структури P (а), її варисторного P_{var} (б) та позисторного P_{PPTC} (в) шарів від прикладеної вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ за різної температури навколишнього середовища T_0 ($^{\circ}\text{C}$):

1 — 20; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80; 5 — 100

Висновки

Отримані залежності основних характеристик електротеплового обмежувача напруги на основі комбінованої структури з шарів металооксидної варисторної кераміки та позисторного полімерного нанокompозита від температури навколишнього середовища дозволили встановити, що:

— у разі підвищення температури навколишнього середовища температура структури та вихідна напруга пристрою на ділянці її обмеження змінюються незначно, а величина струму та потужність розсіювання структури істотно знижуються;

— при фіксованій температурі навколишнього середовища розсіювана потужність практично не змінюється в діапазоні обмеження вхідної напруги;

— залежності розсіюваної варисторним шаром потужності та струму від вхідної напруги ідентичні, а потужність розсіювання позисторного шару має тенденцію до зростання.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element. Patent USA*, no. 7660096.
2. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
3. Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В. Применение самовосстанавливающихся предохранителей «Polyswitch» для предотвращения токовых перегрузок в фотоэлектрических системах. *Відновлювана енергетика*, 2020, № 2, с. 34–44. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).34-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).34-44)
4. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydzhe L. V. et al. *Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph*. USA, Boston, Primedia eLaunch, 2021, 172 p. <https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5>

5. Валеев Х. С., Квасков В. Б. *Нелинейные металлооксидные полупроводники*. Москва, Энергоиздат, 1983, 160 с.
6. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
7. Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. Mineola, New York, Dover Publications, INC., 2002, 442 p.
8. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, no. 15–16, pp. 3709–3712. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004>
9. Тонкошкур А. С., Иванченко А. В. *Моделирование деградации металлооксидных варисторных элементов защиты электрических цепей*. Днепр, Акцент ПП, 2019, 157 с.
10. Brice C. W., Dougal R. A., Hudgins J. L. Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 1005–1010. <https://doi.org/10.1109/28.536858>
11. Cheng S., Tom K., Pecht M. Failure precursors for polymer resettable fuses. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 374–380. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2010.2053371>
12. *Metal oxide varistors, Transient voltage surge suppressors*. https://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/14D_20180620.pdf (Дата звернення: 20 февраля 2022)
13. *FRX Series - Radial Leaded PTC*. https://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31 (Дата звернення: 20 февраля 2022)
14. *Теплопроводность термораст, сравнение терморастм по теплопроводности и вязкости*. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti> (Дата звернення: 20 февраля 2022)
15. Шефтель И. Т. *Терморезисторы*. Москва, Наука, 1973, 415 с.
16. *Thermistor types – their workings and applications*. <https://www.elprocus.com/introduction-to-thermistor-types-with-its-workings-and-applications/> (Дата звернення: 20 февраля 2022)

Дата надходження рукопису до редакції 23.02 2022 р.

Опис статті для цитування:

Іванченко О. В., Тонкошкур О. С. Вплив температури навколишнього середовища на електричні властивості варисторно-позисторної структури. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.03>

Cite the article as:

Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Influence of ambient temperature on electrical properties of varistor-positor structure. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2022.1-3.03>

INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON ELECTRICAL PROPERTIES OF VARISTOR-POSITOR STRUCTURE

Recently, the combined two-layer structure based on varistor ceramics and polymer posistor nanocomposites with carbon filler (known as PolySwitch resettable fuses) has been seen as one of the promising elements for protecting electrical circuits from long-term overvoltages. The varistor and posistor layers are in thermal contact. The main functional property of such a structure is a sharp increase (by several orders of magnitude) in the electrical resistance of the posistor nanocomposite layer during the transfer of thermal energy from the varistor layer heated by overvoltage.

Detailed information about the behavior of such combined varistor-posistor structures under different conditions, particularly in different temperature conditions, is necessary for the effective technical application of such structures as electrothermal overvoltage limiters.

This paper offers research results on the effect of ambient temperature on the electrical characteristics of such voltage limiters.

Structures based on metal oxide ceramics used in the production of serial varistors VCR 14D and a posistor nanocomposite for FRX-type PPTC fuses were used in the experiments of this study.

It has been established that with an increase in the ambient temperature, the temperature and output voltage of such a device change insignificantly in the limitation region, while the current and power dissipation of the layers significantly decrease.

At a fixed ambient temperature, the total power dissipated by the varistor and posistor layers practically does not change in the range of input voltage limitation. The dependence of the power dissipated by the varistor layer on the input voltage is identical to the analogous dependence of the current, and the power dissipation of the posistor layer tends to increase.

Keywords: varistor ceramics, polymer posistor nanocomposite, voltage limiter, electrical characteristics, temperature

REFERENCES

- Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element. Patent USA*, no. 7660096.
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
- Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V. The use of resttable fuses "Polyswitch" to prevent current overloads in photovoltaic systems. *Vidnovluvana Energetika*, 2020, no. 2. pp. 34–44. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2\(61\).34-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).34-44) (Rus)
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashidze L. V. et al. *Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph*. USA, Boston, Primedia eLaunch, 2021, 172 p. <https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5>
- Valeev Kh. S., Kvaskov V. B. *Nonlinear metal-oxide semiconductors*. Moscow, Energoizdat, 1983, 160 p.
- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
- Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. Mineola, New York, Dover Publications, INC., 2002, 442 p.
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, no. 15–16, pp. 3709–3712. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. *Modeling of degradation of metal oxide varistor elements for protection of electrical circuits*. Dnipro, Aktsent PP, 2019, 157 p.
- Brice C. W., Dougal R. A., Hudgins J. L. Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 1005–1010. <https://doi.org/10.1109/28.536858>
- Cheng S., Tom K., Pecht M. Failure precursors for polymer resettable fuses. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2010, vol. 10, no. 3, pp. 374–380. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2010.2053371>
- Metal oxide varistors, Transient voltage surge suppressors*. https://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/14D_20180620.pdf (Data of access: 20 February 2022)
- FRX Series - Radial Leaded PTC*. https://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31 (Data of access: 20 February 2022)
- [The thermal conductivity of the thermal pastes, comparison of the thermal pastes for thermal conductivity and viscosity]. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti> (Data of access: 20 February 2022) (Rus)
- Sheftel I. T. *Thermistors*. Moscow, Nauka, 1973, 415 p. (Rus)
- Thermistor types – their workings and applications*. <https://www.elprocus.com/introduction-to-thermistor-types-with-its-workings-and-applications/> (Data of access: 20 February 2022)