

УДК 620.9:538.9

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Минакова Наталья Николаевна¹,
minakova@asu.ru

Ушаков Василий Яковлевич²,
vyush@tpu.ru

¹ Алтайский государственный университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена тем, что обеспечение бесперебойного электроснабжения предприятий ресурсодобывающих отраслей является неперенным условием их эффективного функционирования. Последнее, в свою очередь, определяется качеством защиты электропотребляющего оборудования (прежде всего электродвигателей) от токов короткого замыкания и перенапряжений в питающей сети. Их ограничение обеспечивается комплексом мер; важнейшей среди них является использование высоковольтных объемных резисторов, способных рассеивать огромные мощности. В последние годы внимание специалистов привлекли наполненные полимеры как материалы для изготовления таких резисторов. Наряду с такими их достоинствами, как: доступность и дешевизна исходных материалов (высокая ресурсоэффективность), хорошо освоенная технология производства таких композиций, им присущ существенный недостаток – сильная зависимость удельного объемного сопротивления от температуры и, следовательно, от режимов их работы. Из-за многообразия процессов в наполненных полимерах, стимулируемых повышенной температурой, необходимо изучение их поведения в зависимости от условий нагрева. Один из часто встречающихся режимов работы полимерных композиционных материалов – повторно-кратковременное воздействие токовой нагрузки, при котором происходят многократные изменения температурного режима, негативно влияющие на стабильность параметров резисторов. Это делает актуальными исследования динамики объемного электрического сопротивления как важнейшего параметра резистора при сложных режимах токовой нагрузки.

Цель: оценка возможности работы наполненных техническим углеродом каучуков в режиме «нагрев–охлаждение»: исследование разброса величины тока в зависимости от токовой нагрузки, времени работы и паузы при нагреве переменным током. Из-за многокомпонентности структуры стабильность электрофизических характеристик во многом определяется режимом их работы.

Методы: инструментальные измерения электрофизических характеристик резистивных полимерных композиционных материалов, статистическая обработка результатов измерений, оценка временных рядов изменения случайных параметров.

Результаты. Выявлены зависимости величины переменного тока, протекающего в наполненных техническим углеродом бутадиен-нитрильных каучуках, от длительности работы и продолжительности пауз при повторно-кратковременном режиме работы. Установлена также возможность проявления неоднозначного влияния длительности паузы на стабильность величины тока. Подтверждена возможность применения показателя Херста для оценки тенденций временного ряда по изменению токовой нагрузки (объемного электрического сопротивления) в повторно-кратковременном режиме работы. Показана зависимость величины самого показателя Херста от длительности анализируемого временного интервала. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по работе наполненных техническим углеродом каучуков при повторно-кратковременном воздействии токовой нагрузки.

Ключевые слова:

Электроснабжение ресурсодобывающих отраслей, ресурсосбережение, наполненные полимеры, резисторы, объемное электрическое сопротивление, режимы работы, нестабильность характеристик, повышенная температура, показатель Херста.

Введение

Полимерные композиционные материалы вызывают возрастающий интерес разработчиков высоковольтных резисторов, способных рассеивать большие мощности при коротких замыканиях и перенапряжениях (грозовых и коммутационных) в электрических сетях, питающих ответственные потребители. К таковым, несомненно, относятся электродвигатели на предприятиях ресурсодобывающих отраслей. Выход их из строя – это не только потеря дорогостоящего оборудования, но и нарушение технологического процесса с огромным экономическим ущербом из-за недополучения продукции. Сдерживающим фактором

для широкомасштабного использования этих материалов является недостаточная стабильность их свойств при нагреве протекающими по ним токами. Нагрев резистивных полимерных композиционных материалов вызывает разнообразные физико-химические процессы: тепловую эмиссию электронов, термоокислительную деструкцию, структурирование, релаксационные процессы, изменение расстояния между частями электропроводящего компонента из-за различия коэффициентов температурного расширения основных компонентов и т. д. [1–3]. Интенсивность процессов и их последствия зависят от режимов работы защищаемого объекта: длительный, повторно-кратковременный (циклический), импульсный и т. д.

Обычно температурная стабильность резистивных материалов оценивается по величине температурного коэффициента сопротивления [4, 5], определяемого при длительном нагреве до заданной температуры. При этом необходимо учитывать, что воздействие на компоненты полимерной композиции при нагреве электрическим током может отличаться от режима нагрева при определении температурного коэффициента сопротивления. При токовой нагрузке нагрев во многом зависит от локального тепловыделения в единичных электрических контактах, которые, в зависимости от характера распределения электропроводящего наполнителя в многокомпонентной системе, могут быть очень разнообразны [6, 7].

Объекты и методы исследования

В работе исследованы свойства резистивных полимерных композиционных материалов в повторно-кратковременном режиме работы. В качестве объектов исследования выбраны наполненные техническим углеродом каучуки из-за их технологичности и экономической эффективности: доступность исходных компонентов, хорошо освоенная промышленная технология изготовления изделий различной формы (цилиндрических, пластинчатых и т. д.) [4, 7].

При выборе составляющих для изготовления полимерных резисторов для промышленного применения руководствуются следующими критериями: для полимеров – низкая стоимость и высокая стойкость к воздействию агрессивной среды, для углеродного наполнителя – низкая стоимость и доступность (углерод промышленной технологии изготовления) [8]. В этой связи в качестве связующего материала применен бутадиен-нитрильный каучук (NBR по ANSI или СКН-40 – в РФ). Электропроводящий наполнитель – технический углерод П-234 (PIR по ASTM). Каучук СКН-40 хорошо зарекомендовал себя при изготовлении теплостойких изделий, предназначенных для работы в воде, трансформаторном масле, растворителях и некоторых других средах [4]. П-234 выбран из-за того, что он производится в промышленных масштабах; этот высокодисперсный технический углерод способен повышать температурную стабильность композиционного материала [9]. При необходимости регулирования величины объемного электрического сопротивления концентрация П-234 менялась от 40 до 80 весовых частей на 100 весовых частей связующей основы.

Испытания выполнялись при приложении переменного напряжения промышленной частоты. Использована описанная в [6] методика, позволяющая реализовать циклическое воздействие токовой нагрузки на резистор в слабых электрических полях с необходимой длительностью воздействия напряжения и длительностью пауз. Величину тока, протекающего в резисторе, регулировали изменением амплитуды переменного напряжения в зависимости от объемного электрического сопротивления испытуемых образцов. Для измерений использовался измерительный комплект К505. Образцы имели форму цилиндров диаметром 30 мм, длиной 600 мм.

Все испытания выполнялись в одинаковых условиях – оставались неизменными окружающая среда, конструктивное исполнение и геометрические размеры измерительной ячейки. Образцы охлаждались при температуре окружающей среды, соответствующей нормальным условиям испытаний – 20 ± 2 °С. Использовался стабилизатор напряжения, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 29322-2014: предельно допустимое отклонение ± 10 % в случае кратковременного отклонения и ± 5 % в случае длительного отклонения. Количество образцов на точку при испытаниях не менее 12. (Определялось по дисперсии исследуемого признака при предельной ошибке не более 5 %). При обработке результатов измерений использованы стандартные статистические пакеты. Статистически значимые отличия при сравнении выборок определялись с помощью T-test (проводился с уровнем значимости 0,05).

Результаты исследования

Один из результатов экспериментов, относящихся к нагреву в первом цикле резисторов, отличающихся величиной исходного сопротивления, представлен на рис. 1.

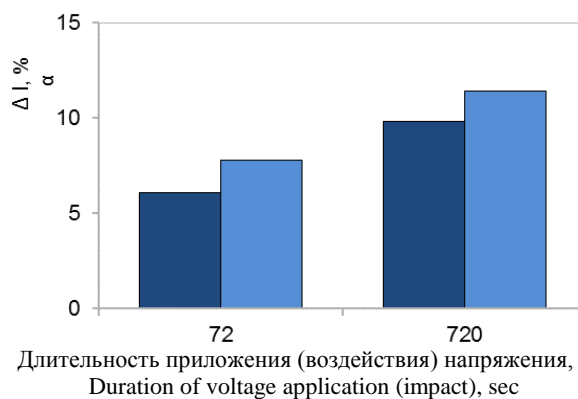


Рис. 1. Зависимость изменения величины тока от времени работы в первом цикле нагрева: левые столбцы – низкоомные резисторы (3917 Ом·м), правые столбцы – высокоомные (9912 Ом·м)

Fig. 1. Dependence of the change in the current value on the operating time in the first heating cycle: the left columns are low-resistance resistors (3917 Ohm-m), the right columns are high-resistance (9912 Ohm-m)

Установлено, что изменение величины тока за первый цикл в зависимости от параметров нагрева соответствует известным для этих материалов закономерностям по влиянию температуры на величину объемного электрического сопротивления, определяемым по изменению температурного коэффициента сопротивления [9]:

- при увеличении приложенного напряжения (начальной величины тока, определяющей температуру нагрева) величина тока со временем (в пределах периода нагружения) уменьшается;
- при увеличении длительности цикла нагрева характер изменения тока сохраняется, а диапазон его изменения расширяется;

- для высокоомных материалов изменение величины тока, отражающее изменение объемного электрического сопротивления, больше, чем для низкоомных.

Оценка влияния времени паузы выполнялась за несколько циклов. На рис. 2 приведены данные за 15 циклов «нагрев–охлаждение».

Изменение величины тока за 15 циклов подчиняется следующим закономерностям:

- на первом цикле закономерности совпадают с представленными ранее: при нагреве ток уменьшается (увеличивается объемное электрическое сопротивление);
- при небольшом значении тока ($I_{нач}=0,06$ А) его величина практически не изменяется в исследованном диапазоне продолжительности фаз нагрузки и паузы;
- при увеличении тока ($I_{нач}=0,5$ А) диапазон его изменения за время работы возрастает;
- увеличение времени работы уменьшает стабильность величины объемного электрического сопротивления резистора.

Влияние длительности паузы для выбранных образцов резисторов 15 циклов «нагрев–охлаждение» подчиняется следующим закономерностям:

- объемное электрическое сопротивление малочувствительно к изменению длительности паузы;
- для низкоомных материалов это проявляется более отчетливо, чем для высокоомных.

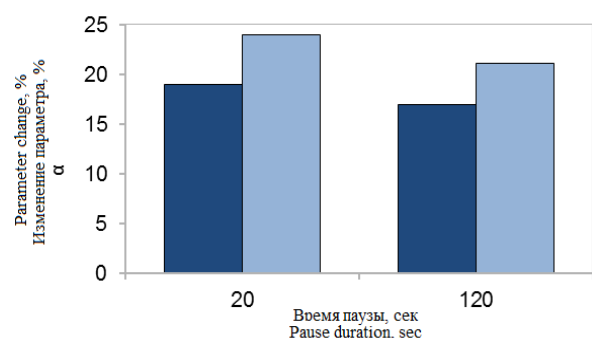


Рис. 2. Зависимость изменения величины тока от времени паузы за 15 циклов при времени работы 100 с: левые столбцы – низкоомные материалы (100 Ом), правые столбцы – высокоомные материалы (1000 Ом)

Fig. 2. Dependence of the current value change on the pause time for 15 cycles with operating time of 100 s: left columns – low-resistance materials (100 Ohm), right columns – high-resistance materials (1000 Ohm)

Известно, что влияние температуры на структуру полимерного композиционного материала во многом зависит от параметров цикла «нагрев–охлаждение» [4, 9–11]. Сделано предположение, что непропорциональное суммарное изменение параметра при изменении длительности паузы обусловлено нестабильностью объёмного электрического сопротивления, которое по циклам может не только уменьшаться, но и увеличиваться. Изменение во времени электрофизи-

ческих параметров материала с многокомпонентной структурой всегда имеет случайную составляющую. Для оценки тенденций временного ряда по изменению величины тока при работе в повторно-кратковременном режиме использовался показатель Херста. Он позволяет оценить характер долгосрочной зависимости стохастического процесса [12, 13].

Для корректной оценки влияния длительности паузы на величину тока была расширена программа эксперимента. По полученным экспериментальным данным за 50 циклов «нагрев–охлаждение» были исследованы временные ряды и построены графики изменения тока по циклам (рис. 3, 4). Применен метод нормированного размаха – (R/S) метод [13]. Временной процесс изменения анализируемого параметра оценивается по величине показателя Херста [13, 14]. Последовательности, для которых $0,50 < H \leq 1,00$, считаются персистентными (трендоустойчивыми). Они сохраняют имеющуюся тенденцию: наблюдаемый в данный момент рост параметра с высокой вероятностью будет наблюдаться и в дальнейшем и, соответственно, наоборот. При возрастании H тенденция усиливается. Диапазон $0 < H < 0,5$ соответствует антиперсистентным рядам: имеющаяся тенденция может смениться на противоположную: после возрастания переменной возможно ее уменьшение и наоборот. Вероятность таких проявлений увеличивается при уменьшении показателя Херста в области менее 0,5.

Испытания проводились по разработанной программе ЭВМ и методике, описанной в [15]. Показатель определялся по двум вариантам аппроксимации:

- 1) «gandom walk» – серия данных рассматривается как случайное блуждание со случайными приращениями (для временных рядов со скачкообразными изменениями благодаря сглаживанию графика при подсчете отклонения от среднего значения);
- 2) «change» – ряд состоит из случайных приращений (для временных рядов с плавными близкими между собой изменениями).

Обрабатывались экспериментальные данные, отражающие изменения величины тока (объемного электрического сопротивления) с течением времени при нагреве в повторно-кратковременном режиме работы. Временной ряд задавался выбором интервала между замерами величины тока при заданной величине напряжения в соответствии с рекомендациями, сформулированными в [15]. На основании полученных данных показатель Херста оценивался по разным циклам. Установлено, что характер аппроксимации существенно не влияет на закономерность изменения показателя Херста для рассматриваемых условий эксперимента и временных интервалов. Статистически значимых отличий при сравнении выборок не наблюдалось. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Процесс изменения величины тока в повторно-кратковременном режиме на временном интервале 0–5 циклов характеризуется показателем Херста $0 < H < 0,5$ (рис. 3). Указанная выше тенденция сохраняется для исследованных режимов работы (рис. 4).

Процесс неустойчив в отношении трендов. В диапазоне 5–15 циклов значение H увеличивается и выходит из диапазона $0 < H < 0,5$ (рис. 3).

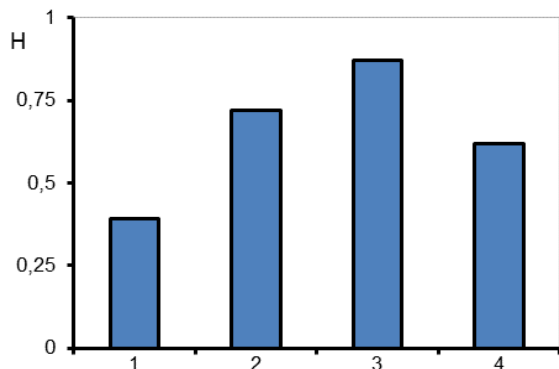


Рис. 3. Показатели Херста на различных временных интервалах: 1) 0–5 циклов; 2) 5–15 циклов; 3) 15–50 циклов; 4) 0–5 циклов после термотренировки

Fig. 3. Hurst exponents at different time intervals: 1) 0–5 cycles; 2) 5–15 cycles; 3) 15–50 cycles; 4) 0–5 cycles after thermal training

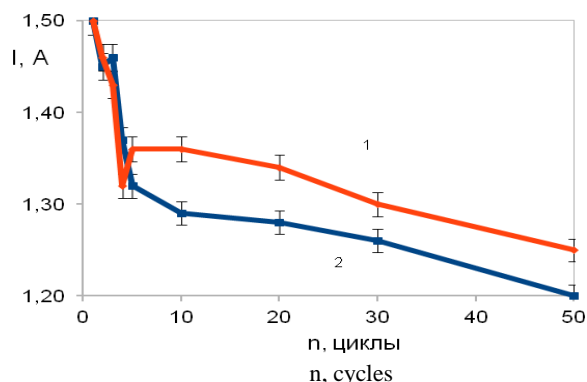


Рис. 4. Зависимость величины тока от количества циклов при разных параметрах режима работы: 1 – $t_p=10$ с; $t_n=110$ с; $t_p=10$ с; $t_n=20$ с

Fig. 4. Current value dependence on the number of cycles for different parameters of the operating mode: 1 – $t_w=10$ s; $t_p=110$ s; $t_w=10$ s; $t_p=20$ s

Данные, полученные в интервале 15–50 циклов (рис. 4), показали, что в этом временном интервале величина объемного электрического сопротивления изменяется значительно слабее, чем в предыдущие временные интервалы. Графики зависимости изменения величины объемного электрического сопротивления от времени характеризуется величиной показателя Херста $0,50 < H \leq 1,00$. Полученные значения дают основание полагать, что это трендоустойчивый временной процесс с долговременными корреляциями между текущим состоянием материала и состоянием его в будущем.

Вывод о возможности прогнозных оценок по показателю Херста для таких материалов проверялся экспериментально для резисторов-образцов при изменении длительности работы и длительности паузы (рис. 4).

Результаты экспериментов подтвердили, что характер изменения объемного электрического сопротивления во времени при увеличении длительности временного интервала существенно не изменяется: он также зависит от длительности временных интервалов, в которых выполнялся анализ.

При увеличенном количестве циклов сохраняются тренды, характерные для начальных циклов: возрастание и уменьшение величины объемного электрического сопротивления сменяют друг друга. На начальных циклах процесс может быть как антиперсистентный, так и персистентный (по крайней мере, в диапазоне величин токов, имеющих место в описываемых экспериментах).

Такая закономерность связана с тем, что в наполненных техническим углеродом каучуках при действии повышенных температур термостимулированные процессы реализуются на различных уровнях: электропроводящая сетка, погруженная в полимерную матрицу, единичный контакт «проводящая фаза – полимер – проводящая фаза». Распределение совокупности единичных контактов по свойствам с учетом их разброса по параметрам зависит от исходных компонентов в смеси [4, 16, 17].

Можно полагать, что изменение тепловой нагрузки на единичный контакт связано с физико-химическими процессами, обусловленными накоплением изменений в структуре материала, которые, в свою очередь, обусловлены длительным пребыванием при повышенной температуре [18–20]. В этой связи представляло интерес оценить возможность минимизации трендоустойчивых процессов с помощью термотренировки. Последняя осуществлялась в режиме интенсивный нагрева: 5 циклов, включающих нагрузку длительностью 100 с в каждом цикле и паузы длительностью 20 с. Начальный ток был равен 1,5 А.

Установлено, что предварительная термотренировка стабилизирует процессы на начальных циклах нагрева. Показатель Херста меняется от 0,39 до 0,62. Нестабильность величины тока после термотренировки уменьшается на 20–22 % по сравнению со значениями до термотренировки.

Заключение

Экспериментальными исследованиями влияния времени работы и времени паузы на изменения величины объемного электрического сопротивления наполненных техническим углеродом каучуков показано, что величина рабочего тока при исследованных временных параметрах уменьшается (объемное электрическое сопротивление увеличивается). Увеличение времени работы сопровождается таким же эффектом. Увеличение длительности паузы в циклическом режиме нагрузки увеличивает температурную стабильность объемного электрического сопротивления. На начальных циклах увеличение длительности паузы может влиять неоднозначно – не только увеличивать стабильность параметра, но и уменьшать ее.

Сделан вывод о том, что показатель Херста как одну из характеристик устойчивости временного ряда можно использовать в качестве дополнительного ин-

струмента для исследования поведения электропроводящих наполненных полимеров в повторно-кратковременном режиме нагрева. По результатам сравнения значений показателя Херста для исследованных временных интервалов выявлено, что его величина зависит от временного диапазона.

Установлено, что характер изменения величины объемного электрического сопротивления в начальных циклах нагрева является антиперсистентным независимо от длительности паузы. Далее временной ряд становится персистентным. Закономерность не зависит от длительности фазы нагрузки и паузы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrical conduction hysteresis in carbon black-filled butyl rubber compounds / M. Alzamil, K. Alfaramawi, S. Abboudy, L. Abulnagr // *International Journal of Modern Physics*. – 2018. – V. 32. – № 9. – P. 1–10.
2. Berki P., Göbl R., Karger-Kocsis J. Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black // *Polymer Testing*. – 2017. – V. 61. – P. 404–415.
3. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites / B. Szadkowski, A. Marzec, M. Zaborski, B. Szadkowski // *Composite Interfaces*. – 2019. – V. 26. – № 8. – P. 729–750.
4. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиты. – М.: Химия, 1984. – 226 с.
5. Malas A., Das A. Influence of modified graphite flakes on the physical, thermo-mechanical and barrier properties of butyl rubber // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 69. – № 9. – P. 38–46.
6. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Физико-технические основы создания высоконаполненных полимеров и управления их резистивными свойствами. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 260 с.
7. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Полимерные композиционные материалы для мощных резисторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 74–80.
8. Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black // *Advances in Polymer Science*. – 1971. – V. 8. – P. 155–237.
9. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Регулирование воспроизведения параметров полимерного резистора при повышенных температурах // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 7–13.
10. Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2003. – V. 76. – № 3. – P. 591–596.
11. Song Yihu, Zheng Qiang. A guide for hydrodynamic reinforcement effect in nanoparticle filled polymers // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2016. – V. 41. – P. 318–346.
12. Beran J. Statistical methods for data with long-range dependence // *Statistical Science*. – 1992. – V. 7. – № 4. – P. 404–416.
13. Hurst H., Black R. and Simaury Y. Long-term storage. An Experimental Study. – London: Constable, 1965. – 145 p.
14. Столинг В. Современные компьютерные сети. – СПб: Питер, 2003. – 784 с.
15. Minakova N.N., Mansurov A.V. Hurst exponent-based analysis of the behavior of filled polymers in aggressive media. AIP Conference Proceedings, 2019. DOI: doi.org/10.1063/1.5132091
16. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding effectiveness of polymeric nanocomposites filled with iron // *Procedia Materials Science*. – 2015. – № 11. – P. 700–705.
17. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications / Chen Jianwen, Zhu Yutian, Huang Jinrui, Zhang Jiaoxia // *Polymer Reviews*. – 2020. – V. 61. – № 1. – P. 1–37.
18. An electrically conductive polymer composite with a co-continuous segregated structure for enhanced mechanical performance / Xu Ying-Te, Wang Yan, Zhou Chang-Ge, Sun Wen-Jin, Dai Kun, Tang Jian-Hua, Lei Jun, Yan Ding-Xiang, Li Zhong-Ming // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2020. – V. 8. – P. 11546–11554.
19. Yang Guijun, Park Mira, Park Soo-Jin. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites // *Composites Communications*. – 2019. – V. 14. – P. 34–42.
20. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly / Zhang Bo-Yuan, Guo Bao-Hua, Jian Yu, Guo Zhao-Xia // *Composites Science and Technology*. – 2019. – V. 179. – P. 106–114.

Поступила 26.05.2021 г.

Сведения об авторах

Минакова Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайского государственного университета.

Ушаков В.Я., доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.9: 538.9

FEATURES OF BEHAVIOR OF FILLED POLYMERS FOR RESISTORS UNDER A CYCLIC LOADING MODE

Natalya N. Minakova¹,
minakova@asu.ru

Vasily Ya. Ushakov²,
vush@tpu.ru

¹ Altai State University,
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that ensuring uninterrupted power supply to enterprises in resource-extracting industries is an indispensable condition for their effective functioning. The latter, in its turn, is determined by the quality of protection of power-consuming equipment (primarily electric motors) from short-circuit currents and overvoltages in the supply network. Their limitation is provided by a set of measures; the most important of them is the use of high voltage bulk resistors capable of dissipating enormous power. In recent years, filled polymers have attracted the attention of specialists as materials for the manufacture of such resistors. Along with such their advantages as: the availability and low cost of starting materials, well-mastered technology for production of such compositions, they have a significant drawback – strong dependence of the specific volumetric resistance on temperature and, consequently, on the modes of their operation. Due to the variety of processes in filled polymers, stimulated by elevated temperatures, it is necessary to study their behavior depending on heating conditions. One of the most common modes of operation of polymer composite materials is repeated short-term exposure to current load, in which multiple changes in temperature occur, negatively affecting the stability of the resistor parameters. This makes it relevant to study the dynamics of volumetric electrical resistance, as the most important parameter of a resistor, in complex current load modes.

The purpose of the work is to assess the possibility of operating rubbers filled with carbon black in the «heating–cooling» mode: studying the spread of the current value depending on the current load, operating time and pause during heating with alternating current. Due to the multicomponent structure, the stability of the electro physical characteristics is largely determined by the mode of their operation.

Methods: instrumental measurements of electro physical characteristics of resistive polymer composite materials, statistical processing of measurement results, assessment of time series of changes in random parameters.

Results. The authors have revealed the dependences of the magnitude of the alternating current flowing in carbon black butadiene-nitrile rubbers on duration of operation and duration of pauses in intermittent operation. The authors established as well the possibility of an ambiguous effect of the pause duration on current value stability. The possibility of using the Hurst exponent for assessing the tendencies of the time series by the change in the current load (volumetric electrical resistance) in intermittent operation was confirmed. The dependence of the value of the Hurst exponent itself on the duration of the analyzed time interval is shown. On the basis of the studies carried out, the authors developed the recommendations for operation of rubbers filled with carbon black under repeated short-term exposure to current load.

Key words:

Power supply of resource-extracting industries, resource saving, filled polymers, resistors, volumetric electrical resistance, operating modes, instability of characteristics, elevated temperature, Hurst exponent.

REFERENCES

- Alzamil M.A., Alfaramawi K., Abboudy S., Abulnasr L. Electrical conduction hysteresis in carbon black-filled butyl rubber compounds. *International Journal of Modern Physics*, 2018, vol. 32, no. 9, pp. 1–10.
- Berki P., Göbl R., Karger-Kocsis J. Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black. *Polymer Testing*, 2017, vol. 61, pp. 404–415.
- Szadkowski B., Marzec A., Zaborski M. Effect of different carbon fillers on the properties of nitrile rubber composites. *Composite Interfaces*, 2019, vol. 26, no. 8, pp. 729–750.
- Gul V.E., Shenfil L.Z. *Elektroprovodyashchie polimernye kompozity* [Electrically conducting polymer compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 226 p.
- Malas A., Das A. Influence of modified graphite flakes on the physical, thermo-mechanical and barrier properties of butyl rubber. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 69, no. 9, pp. 38–46.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. *Fiziko-tehnicheskie osnovy sozdaniya vysokonapolnennykh polimerov i upravleniya ikh rezistivnymi svoystvami* [Physical and technical foundations for creating highly filled polymers and controlling their resistive properties]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 260 p.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Polymers with carbon fillers for powerful resistors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 74–80. In Rus.
- Kraus G. Reinforcement of elastomers by carbon black. *Advances in Polymer Science*, 1971, vol. 8, pp. 155–237.
- Minakova N.N., Ushakov V.Ya. Regulation of reproduction of polymer resistor parameters at increased temperatures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 7–13. In Rus.
- Gamlitskii Yu.A., Bass Yu.P. On the description of the phenomenon of filled elastomer strengthening. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 3, pp. 591–596.
- Song Yihu, Zheng Qiang. A guide for hydrodynamic reinforcement effect in nanoparticle filled polymers. *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 2016, vol. 41, pp. 318–346.
- Beran J. Statistical methods for data with long-range dependence. *Statistical Science*, 1992, vol. 7, no. 4, pp. 404–416.
- Hurst H., Black R. and Simairy Y. *Long-term storage. An experimental study*. London, Constable, 1965. 145 p.
- Stallings V. *Sovremennye kompyuternye seti* [Modern computer networks]. St-Petersburg, Piter Publ., 2003. 784 p.
- Minakova N.N., Mansurov A.V. Hurst exponent-based analysis of the behavior of filled polymers in aggressive media. *AIP Conference Proceedings*, 2019. DOI: doi.org/10.1063/1.5132091.

16. Anaraki N.I., Poursalehi R. Shielding effectiveness of polymeric nanocomposites filled with iron. *Wüstite Nanoparticles. Procedia Materials Science*, 2015, no. 11, pp. 700–705.
17. Chen Jianwen, Zhu Yutian, Huang Jinrui, Zhang Jiaoxia. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications. *Polymer Reviews*, 2020, vol. 61, no. 1, pp. 1–37.
18. Xu Ying-Te, Wang Yan, Zhou Chang-Ge, Sun Wen-Jin, Dai Kun, Tang Jian-Hua, Lei Jun, Yan Ding-Xiang, Li Zhong-Ming. An electrically conductive polymer composite with a co-continuous segregated structure for enhanced mechanical performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, vol. 8, pp. 11546–11554.
19. Yang Guijun, Park Mira, Park Soo-Jin. Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites. *Composites Communications*, 2019, vol. 14, pp. 34–42.
20. Zhang Bo-Yuan, Guo Bao-Hua, Jian Yu, Guo Zhao-Xia. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 179, pp. 106–114.

Received: 26 May 2021.

Information about the authors

Natalya N. Minakova, Dr. Sc., professor, Altai State University.

Vasily Ya. Ushakov, Dr. Sc., Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.