

УДК 53:621.3

**Применение текстурного анализа для оценки стабильности распределения падения напряжения по длине крупногабаритного резистора из полимерных композиционных материалов**

*Н.Н. Минакова, В.С. Трофимов*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

**Application of Texture Analysis for Voltage Drop Distribution Evaluation Along the Length of a Large-Sized Polymer Composite Resistor**

*N.N. Minakova, V.S. Trofimov*

Altai State University (Barnaul, Russia)

Рассматриваются результаты оценки возможности применения текстурного анализа к изучению равномерности распределения падения напряжения по длине крупногабаритного резистора.

В рамках подбора инструментария, позволяющего оценивать равномерность распределения падения напряжения по длине крупногабаритного резистора на стадии проектирования рецептуры, анализировалась возможность выделения количественной характеристики, имеющей корреляционную связь с равномерностью распределения напряжения по длине резистора.

Показано, что текстурный анализ микрофотографий структуры наполненных техническим углеродом каучуков может быть использован для оценки равномерности распределения напряжения по длине крупногабаритного резистора. Экспериментально установлено, что количественной характеристикой текстурной картины может служить энтропия гистограммы текстурного признака.

Выполнены экспериментальные исследования для оценки равномерности распределения напряжения по длине крупногабаритного резистора в зависимости от электропроводящего наполнителя (концентрации и вида), а также вида матрицы. Они включали: замеры падения напряжения по участкам одинаковой длины; вычисления по полученным результатам напряженности электрического поля на каждом участке крупногабаритного резистора; расчеты разброса напряженности электрического поля по участкам одинаковой длины ( $K_E$ ).

Установлено, что разброс падения напряжения по длине крупногабаритного резистора имеет корреляционную связь с энтропией текстурного признака.

The paper discusses the possibility evaluation results of texture analysis application for studying the voltage drop distribution uniformity along the length of a large-sized resistor.

As a part of tools selection process for the distribution uniformity evaluation at the design stage, the possibility of obtaining the quantitative parameter that correlates with the distribution uniformity is analyzed.

It is shown that texture analysis of structure microphotographs of carbon-filled rubbers can be utilized for the evaluation of the distribution uniformity. Conducted experiments reveal that the histogram entropy of a textural feature can provide the quantitative evaluation.

Experimental studies are conducted for the distribution uniformity evaluation depending on concentration and type of a filler and matrix form. Voltage drops have been measured over sections of equal length along the length of the resistor. Then, electric field intensities and spread of intensities have been calculated ( $K_E$ ).

It is revealed that the spread of voltage drops along the length of the large-sized resistor correlates with the entropy of a textural feature.

**Ключевые слова:** крупногабаритные резисторы, макроструктура, объемное электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, текстурный анализ, наполненные полимеры, энтропия текстурного признака.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-08

Полимерные композиционные материалы относятся в настоящее время к числу наиболее перспективных. Наполненные техническим углеродом каучуки используются в качестве материала для изготовления антистатических изделий, резисторов, экраны кабелей и т. д. [1]. Особенно жесткие требования по электрофизическим и физико-механическим свойствам предъявляются к материалу, используемому для изготовления резисторов. Это обусловлено широким спектром режимов работы резисторов (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный, импульсный) и многообразием областей их применения (электроэнергетика, химическая промышленность, строительство и т. д.).

К достоинствам таких материалов относится антикоррозионная стойкость, удобство конструктивной сборки, широкий диапазон номиналов сопротивления, приемлемые механические характеристики. Указанные свойства полимерных композиционных материалов дают возможность изготовления крупногабаритных резисторов. Такие резисторы необходимы для высоковольтной электрофизической аппаратуры вместо используемых в настоящее время жидкостных, проволочных и т. п.

Резисторы для высоковольтных электрофизических установок должны удовлетворять специфическим требованиям. Например, в генераторах импульсного напряжения используется ступенчатая зарядка высоковольтных конденсаторов [2]. Конструктивное исполнение генератора импульсного напряжения (лестничный, этажный, башенный колонковый) требует резисторов специфической конструкции — размером 0,6 м, 1 м и более и электрическими контактами через равные промежутки (рис. 1). Изготовление крупногабаритных резисторов с равномерным распределением падения напряжения по ступеням конструкций представляет собой нетривиальную задачу. Технология их изготовления длительна во времени и включает целый комплекс этапов [3].

Поэтому очень актуален подбор инструментария, позволяющего оценивать равномерность распределения падения напряжения по длине крупногабаритного резистора на стадии проектирования рецептуры. В настоящее время подобные задачи решаются методом «проб и ошибок».

Цель данной работы — оценка возможности применения текстурного анализа к изучению равномер-

**Keywords:** large-sized resistors, macrostructure, electrical volume resistivity, temperature coefficient of resistance, texture analysis, filled polymers, the entropy of a textural feature.

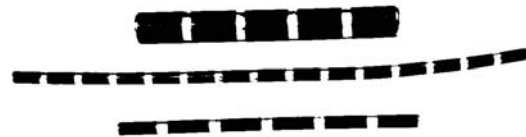


Рис. 1. Резисторы из полимерных композиционных материалов

ности распределения падения напряжения по длине крупногабаритного резистора.

Были поставлены следующие задачи:

1. Применить текстурный подход для оценки равномерности распределения напряжения по длине резистора.
2. Проверить возможность выделения количественной характеристики в рамках текстурного подхода, имеющей корреляционную связь с равномерностью распределения напряжения по длине резистора.
3. Провести экспериментальные исследования, позволяющие оценить работоспособность предложенной характеристики.

Текстура — это пространственное свойство объекта, состоящее в почти периодическом изменении яркости его поверхности и позволяющее зрительно выделить объект из ряда ему подобных [4–6]. Так как текстура — свойство окрестности точки изображения, количественная оценка текстуры полимерной матрицы выполнялась на квадратной площадке размером  $(2W + 1) \times (2W + 1)$ , центр которой — заданная точка. Тогда по микрофотографии можно сформировать следующую топологическую модель  $E(j, k)$  [5].

$$E(j, k) = \begin{cases} \text{для всей поверхности, занятой} \\ \text{частицами углерода;} \end{cases} \quad (1)$$

$$E(j, k) = 0 \quad \text{в противном случае.}$$

В качестве текстурного признака можно использовать число перепадов яркости в указанной окрестности для каждой точки изображения топологической модели композита, рассчитав его по формуле

$$T(j, k) = \frac{1}{(2W + 1)^2} \cdot \sum_{m=j-W}^{j+W} \sum_{n=k-W}^{k+W} E(m, n), \quad (2)$$

где  $(j, k)$  — координаты текущей точки изображения.

$N_c$  частиц углерода, заполняющие долю  $v_c$  данного участка поверхности топографической модели,

при увеличении степени разветвленности сажевой сетки порождают *энтропию заполнения* полимерной матрицы независимо от того, по какой причине изменилась структура сажевой сетки [7].

$$\Delta S_{\text{заполн}} = -N_c \cdot k \cdot \ln \nu_c \quad (3)$$

В простейшем случае, когда полная поверхность участка содержит  $N = (2W + 1)^2$  точек, каждая частица наполнителя может занимать одну точку изображения, а оставшаяся часть точек  $N_m = N - N_c$  принадлежит матрице. Доля  $\nu_c$  определится как

$$\nu_c = N_c / (N_c + N_m). \quad (4)$$

Для малых значений  $N_m / N_c$  энтропия заполнения равна

$$\frac{\Delta S_{\text{заполн}}}{k} \approx N_m \ln \frac{N_m}{N_c}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что при увеличении степени разветвленности сажевой сетки, когда число частиц углерода  $N_c$  в данной окрестности увеличивается, энтропия заполнения полимерной матрицы растет, следовательно, и значение текстурного признака  $T(j, k)$  также будет увеличиваться.

Поскольку текстуру поверхности реальных компози в пределах микрофотографии лишь приближенно можно считать статистически однородной, то в общем случае предпочтительнее более обоснованная статистически количественная оценка текстуры, которая должна описывать форму гистограммы значений  $T(j, k)$ , реализовавшихся для данного среза.

С этой целью применен алгоритм обработки, включающий следующие этапы:

1. Формирование плоских топологических моделей  $E(j, k)$  в соответствии с выражением (1).
2. Вычисление массивов текстурного признака  $T(j, k)$  согласно правилу (1).
3. Построение гистограмм частотного распределения для всех образцов.

4. Анализ и количественное описание полученных гистограмм.

Для количественного описания свойств распределения текстурного признака был предложен параметр — энтропия текстурного признака  $\Xi = \Delta S_{\text{текст.}}$  [4]

$$\Delta S_{\text{текст.}} = - \sum_{k=0}^{N-1} P_k \cdot \log_2 P_k. \quad (6)$$

Она возрастает тем больше, чем больше форма его распределения приближается к равномерному.

Экспериментальные исследования на крупногабаритных резисторах (рис. 1) включали:

- замеры падения напряжения по участкам одинаковой длины;
- вычисления по результатам замеров напряженности электрического поля на каждом участке крупногабаритного резистора;
- расчеты по этой выборке разброса напряженности электрического поля по участкам одинаковой длины ( $K_E$ ).

Результаты измерения энтропии текстурного признака и разброса напряженности электрического поля по участкам одинаковой длины ( $K_E$ ) для материалов разного состава указаны в таблице. Эксперименты проводились на композиционных материалах, отличающихся свойствами матрицы (каучука) и наполнителя (технического углерода). Применен технический углерод различной структурности — от низкоструктурного (П-514) до высокоструктурного электропроводящего (П-366 Э), применение которого в композиционном материале уменьшает величину удельного объемного электрического сопротивления [8].

На рисунке 2 представлены зависимости коэффициентов вариации падения напряжения  $K_E$  от концентрации технического углерода в наполненных техническим углеродом каучуках, отличающихся видом матрицы и электропроводящего наполнителя.

Для крупногабаритных резисторов, изготовленных из рецептур, основные компоненты и концен-

Состав материала			Измеряемые параметры	
матрица	наполнитель	концентрация (на 100 в. ч. матрицы)	$K_{E,\%}$	$\Xi_{\text{текст. пр.}}$
БК-2055	П-514	80 в. ч.	28	2,3
БК-2055	П-514	40 в. ч.	42	1,7
БК-2055	П-234	80 в. ч.	18	2,7
БК-2055	П-366 Э	80 в. ч.	16	2,92
БК-2055	П-366 Э	40 в. ч.	36	2,1
СКМС-30 АРК	П-514	40 в. ч.	39	1,84
СКМС-30 АРК	П-234	80 в. ч.	14	3,01
СКМС-30 АРК	П-234	40 в. ч.	32	2,38

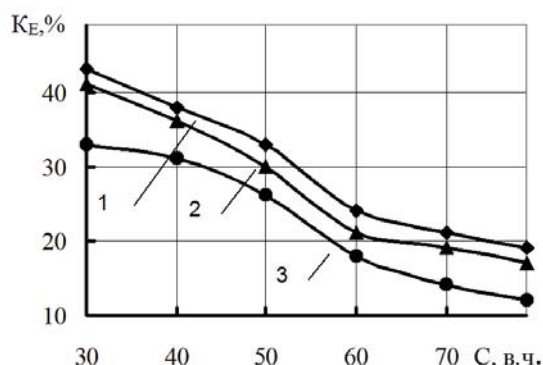


Рис. 2. Зависимость коэффициентов вариации падения напряжения  $K_E$  от концентрации технического углерода в композите: 1 — СКМК-30АРК, П-514; 2 — БК-2055, П-234; 3 — СКМС-30АРК, П-234

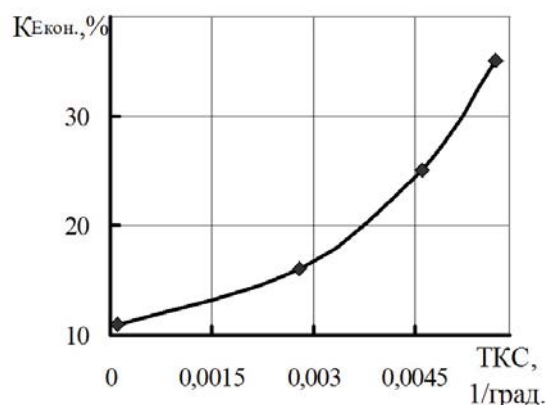


Рис. 3. Зависимость коэффициентов вариации падения напряжения  $K_E$  от температурного коэффициента сопротивления (ТКС) материала

трация которых указаны в таблице, измерялась также величина температурного коэффициента сопротивления (ТКС) по ГОСТ 21342.15–78. График зависимости между температурным коэффициентом сопротивления и коэффициентами вариации падения напряжения  $K_E$  по длине крупногабаритного резистора представлен на рисунке 3. Температурный коэффициент сопротивления во многом определяется структурой наполнителя [1], что дает основания предполагать корреляционную взаимосвязь между этим параметром и текстурными признаками.

Был выполнен корреляционный анализ между электрофизическими характеристиками и значениями коэффициентов вариации падения напряжения  $K_E$ . Полученные результаты подтверждают, что разброс падения напряжения по длине крупногабаритного резистора имеет корреляционную связь с энтропией текстурного признака. Установлено, что для рассматриваемых композиционных материалов (табл.) корреляционное отношение между разбросом напряженности электрического поля, рассчитанным по участкам одинаковой длины крупногабаритного

резистора, и энтропией текстурного признака составляет 0,74–0,92.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. Для изучения равномерности распределения напряжения по длине резистора апробирован текстурный метод. Показано, что текстурный анализ микрофотографий структуры наполненных техническим углеродом каучуков может быть использован для оценки равномерности распределения напряжения по длине крупногабаритного резистора.

2. Предложен алгоритм количественной оценки текстурной картины структуры, полученной в результате микроскопических исследований. Экспериментально установлено, что количественной характеристикой текстурной картины может служить энтропия гистограммы текстурного признака.

3. Выполнены экспериментальные исследования для оценки равномерности распределения напряжения по длине крупногабаритного резистора в зависимости от электропроводящего наполнителя (концентрации и вида), а также вида матрицы.

### Библиографический список

1. Минакова Н.Н. Работа резистивных полимерных многокомпонентных материалов в электроустановках. — Барнаул, 1997.  
 2. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. — М.; Л., 1964.  
 3. Голицын В.П., Минакова Н.Н. Промышленная технология изготовления электротехнических изделий из высоконаполненных эластомеров // Композиты — в народное хозяйство России (Композит-97) : сб. тез. докл. Междунар.

науч.-техн. конф. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. — Барнаул, 1997.  
 4. Прэйт У. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. — М., 1982.  
 5. Минакова Н.Н., Карпов С.А., Ушаков В.Я. Текстурный метод исследования резистивных свойств дисперсно-наполненных эластомеров // Известия вузов. Физика.— 2000. — Т. 43, № 10.

6. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Текстурно-фрактальный анализ микроскопических срезов образцов композиционных материалов, наполненных техническим углеродом // Известия Томского политехнического ун-та. — 2006. — Т. 309, № 6.

7. Займан Дж. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем / пер. с англ. — М., 1982.

8. Горелов В.П., Минакова Н.Н., Грунин В.К. Применение электропроводящего технического углерода для резисторов энергетического назначения // Получение и свойства электропроводящего технического углерода : сб. научных тр. ВНИИТУ / ЦНИИТЭнефтехим. — Омск, 1981.