

Статистическое моделирование в задачах исследования умных материалов

Л. Каспшик, В. А. Черненко, У. А. Персиянова, М. С. Астафьев, Т. Р. Попов, Н. К. Замышляева, М. З. Каримов, И. С. Шилов,

Научный руководитель: С.М. Борохов, А.С. Тепляков

Аннотация

Работа посвящена применению статистических методов для решения задач анализа результатов различных типов испытаний, наблюдений и экспериментов над умными материалами. В статье приводится описание методики и полученные результаты прямых измерений, обосновывается применение к ним статистических методов для получения нормальных распределений, после чего приводятся результаты выполненных расчётов. Анализируется применимость использованных методов для решения задач обработки данных экспериментов, делается вывод о перспективах использования предлагаемого метода в задачах такого типа.

Введение

Анализ результатов экспериментов, наблюдений и испытаний является главной задачей научного исследования. Однако в ходе этого зачастую возникает проблема дефицита доступных данных для проведения полноценного анализа с использованием общепринятых статистических и математических инструментов (например, гармонического или Фурье-анализа, вейвлет-преобразований и иных). Такая ситуация может возникнуть вследствие ограниченности наблюдательной или экспериментальной базы, дороговизны расходников, сложности проведения исследований и многих других причин.

В рамках данного исследования предлагается использовать методы статистического моделирования для обработки результатов малых серий наблюдений и экспериментов. В качестве предмета исследования были выбраны эксперименты с умными материалами: полиамидной электропроводящей мононити AMPERETEX.

Целью исследования является применение методов статистического моделирования в задачах исследования умных материалов. Для её достижения были решены следующие задачи:

1. Проведение измерений физических и механических параметров мононитей;
2. Перевод результатов измерений в цифровой формат в соответствии с общепринятыми стандартами;
3. Использование средств статистического моделирования для получения нормального распределения результатов измерений;
4. Анализ выполненного исследования, формулирование выводов по его результатам.

Постановка задачи

В рамках выполнения настоящей исследовательской работы были использованы несколько лабораторных образцов полиамидной электропроводящей мононити AMPERETEX. Образцы были разделены на отрезки равной длины, в исследовании использовалось десять таких отрезков. Параметры каждого из них были измерены по единой методологии, соответствующей инструкциям и руководствам к следующему оборудованию:

1. Электронный цифровой микрометр МКЦ-25.
2. Весы лабораторные аналитические METTLER TOLEDO ME303/A.
3. Универсальная разрывная машина Instron 34TM-10, пневматические захваты бокового действия.
4. LCR-метр лабораторный МEGEОН14470.

Испытания и измерения выполнялись в следующих условиях:

1. Расчет линейной плотности нити (в текс) через эталонную длину (1 метр) и массу, измеренную весами аналитическими METTLER TOLEDO ME303/A; температура воздуха $24 \pm 2^\circ\text{C}$; атмосферное давление 765 мм рт. ст.; относительная влажность воздуха $52 \pm 2\%$
2. Измерение разрывной нагрузки (в Н) универсальной разрывной машиной. Базовая длина 200 мм; скорость 200 мм/мин; температура $24 \pm 2^\circ\text{C}$; давление 776 мм рт. ст.
3. Расчет удельной разрывной нагрузки (в сН/текс).
4. Измерение относительного удлинения при разрыве (в %) универсальной разрывной машиной. Базовая длина 200 мм; скорость 200 мм/мин; температура $24 \pm 2^\circ\text{C}$; давление 765 мм рт. ст.
5. Измерение контактного электрического сопротивления нити с помощью лабораторного LCR-метра МEGEОН14470. Расстояние между клеммами – полная длина нити 1 метр, температура $24 \pm 2^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $52 \pm 2\%$.
6. Расчёт удельного линейного электрического сопротивления через измеренное значение электрического сопротивления и эталонное значение длины нити (1 метр).

Результаты измерений

Каждый тип измерения проводился серией из 20 измерений, результаты которых записывались в файлы формата JSON. Этот формат является общепринятым для современных научных исследований в различных областях. Полученные данные были импортированы из файлов в небольшой обработчик, написанный на языке программирования Python.

Результаты измерений представлены в виде графиков, отражающих распределение измеряемых величин по номерам измерений в серии (рис. 1-6):

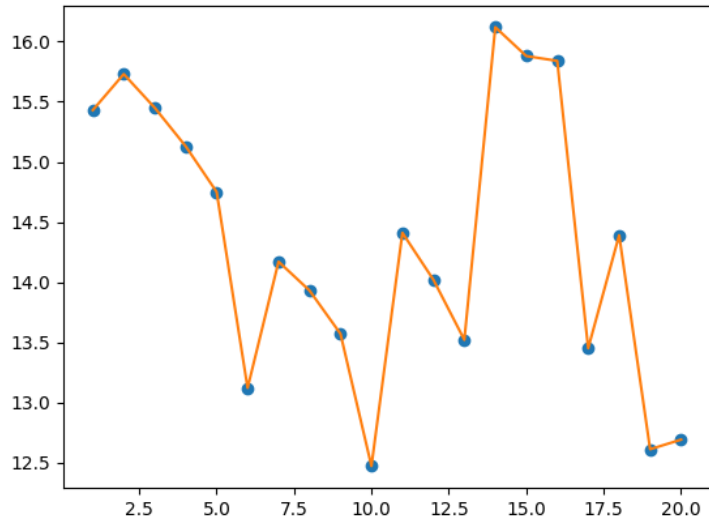


Рисунок 1. Линейная плотность нити, текс

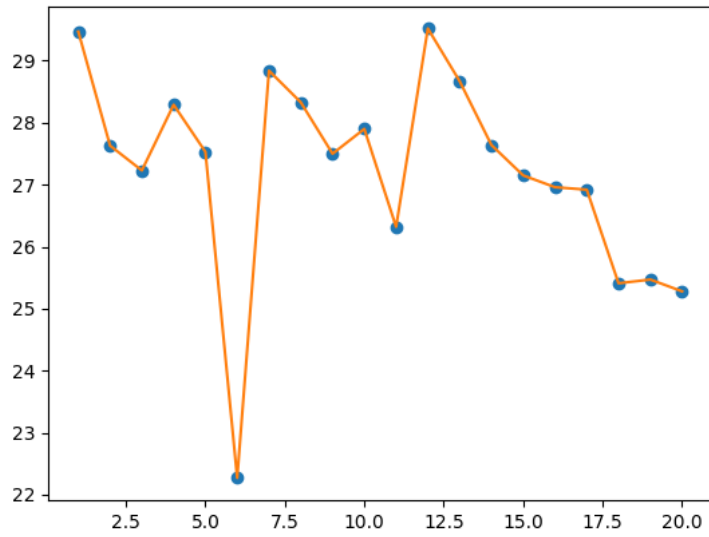


Рисунок 2. Сила разрыва нити, Н

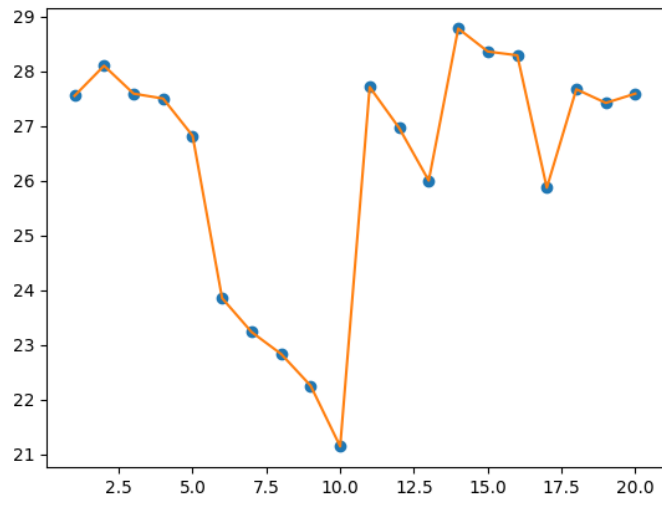


Рисунок 3. Деформация нити, %

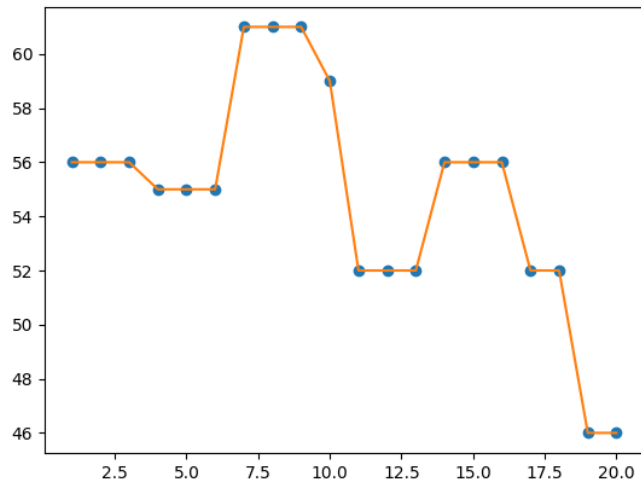


Рисунок 4. удельная разрывная нагрузка, сН/текс

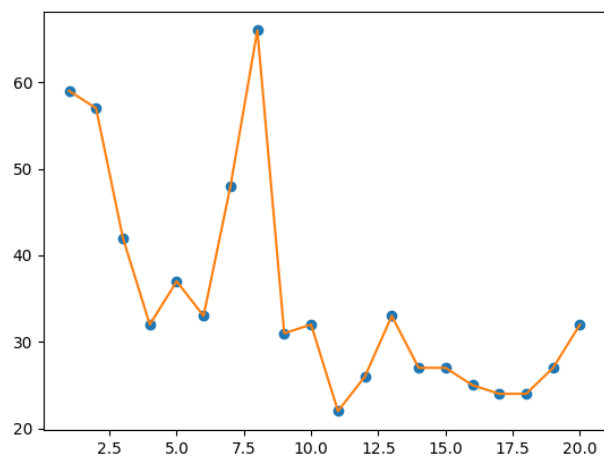


Рисунок 5. Электрическое сопротивление, кОм

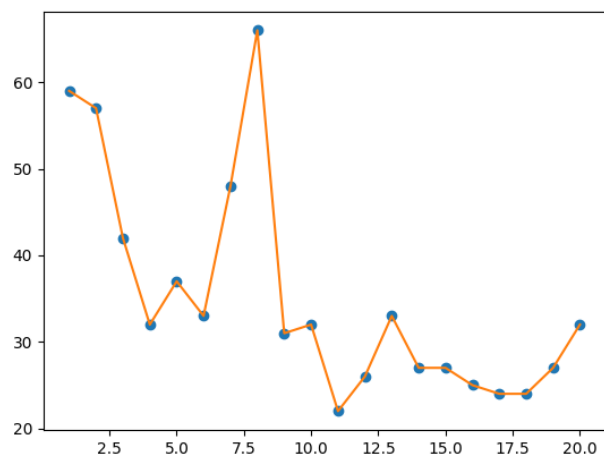


Рисунок 6. Удельное линейное электрическое сопротивление, кОм/м

Использование статистических методов

Полученные в результате измерений и экспериментов данные очевидно недостаточны для применения к ним общепринятых методов анализа ввиду недостаточности измерений в имеющихся выборках. Для иллюстрации этого утверждения попробуем построить вероятностное распределение полученных результатов в наглядном виде с помощью диаграмм (рис. 7-12):

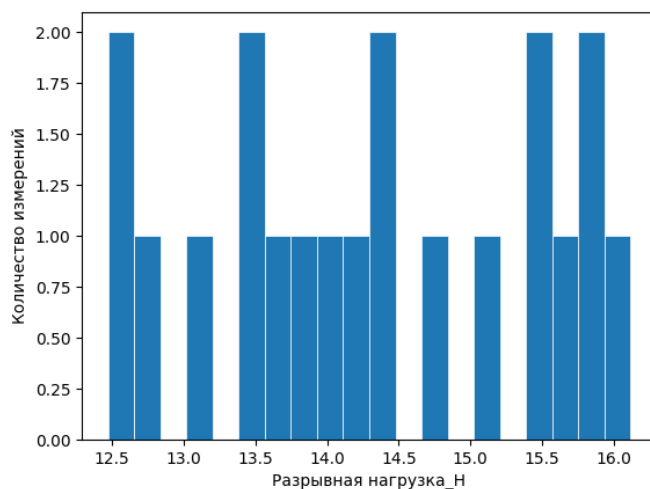


Рисунок 7. Распределение результатов расчета линейной плотности нити

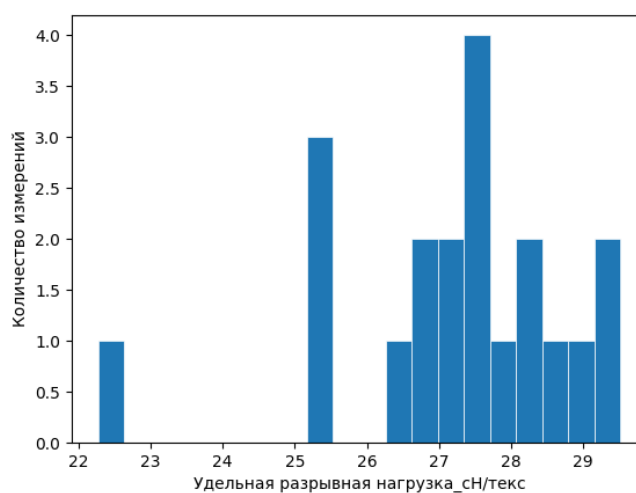


Рисунок 8. Распределение результатов измерения силы разрыва нити

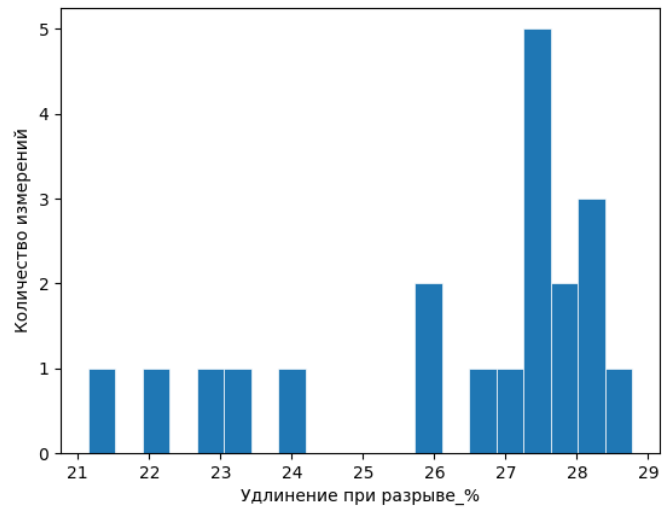


Рисунок 9. Распределение результатов расчета деформации нити

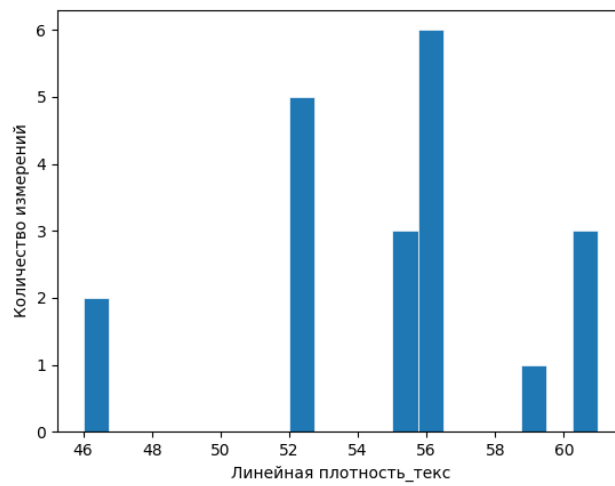


Рисунок 10. Распределение результатов измерения удельной разрывной нагрузки

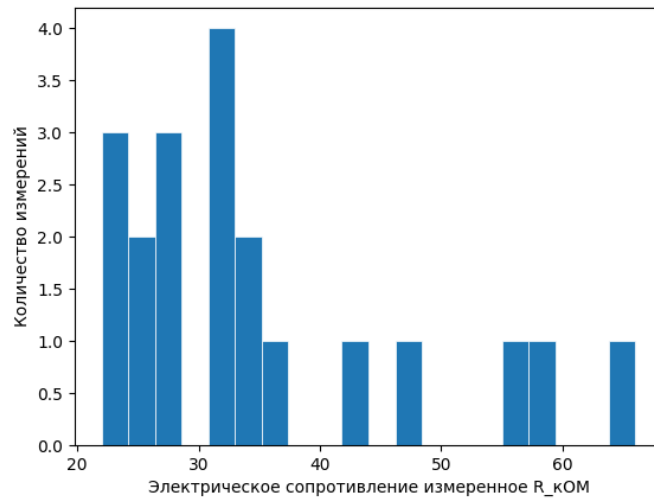


Рисунок 11. Распределение результатов измерения электрического сопротивления

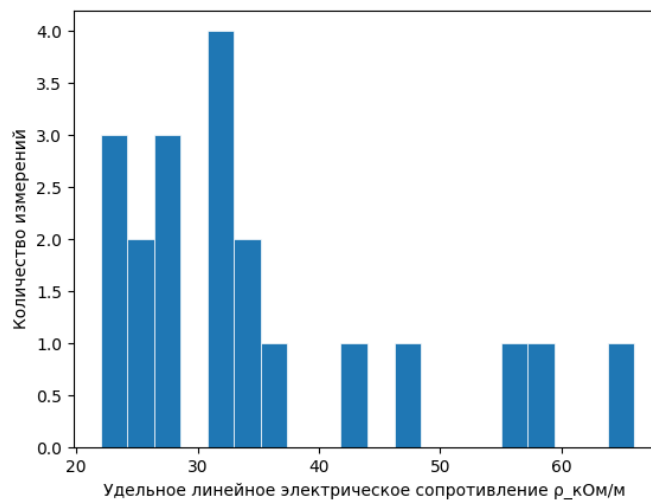


Рисунок 12. Распределение результатов расчёта удельного линейного электрического сопротивления

Приведённые диаграммы наглядно иллюстрируют несоответствие полученных результатов требованиям статистического анализа. Для исправления этой ситуации было использовано статистическое моделирование с целью получения нормального распределения измеряемой величины, которое можно будет использовать для дальнейшего анализа. На основании полученных данных измерений были определены следующие параметры для каждой из серий измерений:

1. Математическое ожидание μ ;
2. Среднеквадратичное отклонение σ ;
3. Дисперсия распределения σ^2 ;

Вышеперечисленные параметры позволили определить нормальное распределение для каждой из серий измерений с помощью следующей формулы:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right)$$

С помощью средств языка программирования Python, включая библиотеки `numpy` и `matplotlib`, значения распределения $f(x)$ могут быть получены с заданной частотой дискретизации, заведомо достаточной для проведения дальнейшего их анализа. Так, в рамках настоящей работы были получены следующие графики нормального распределения измеренных параметров мононити (рис. 13-18):

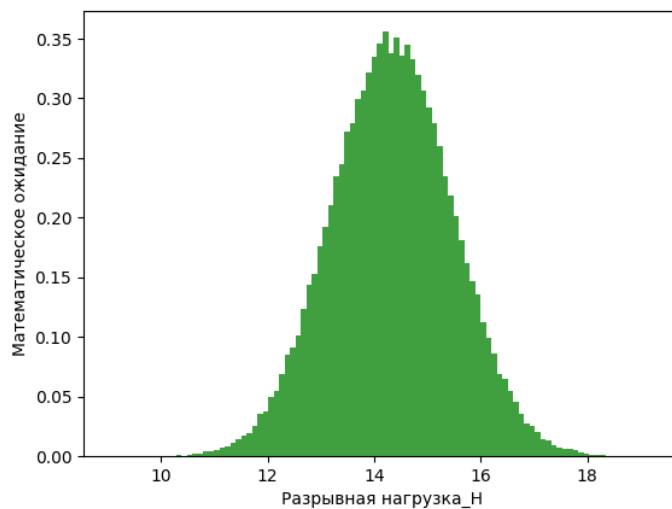


Рисунок 13. Нормальное распределение результатов расчета линейной плотности нити

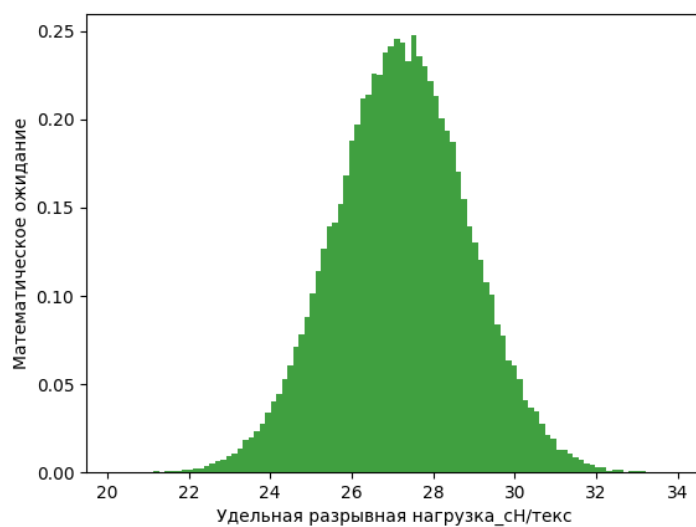


Рисунок 14. Нормальное распределение результатов измерения силы разрыва нити

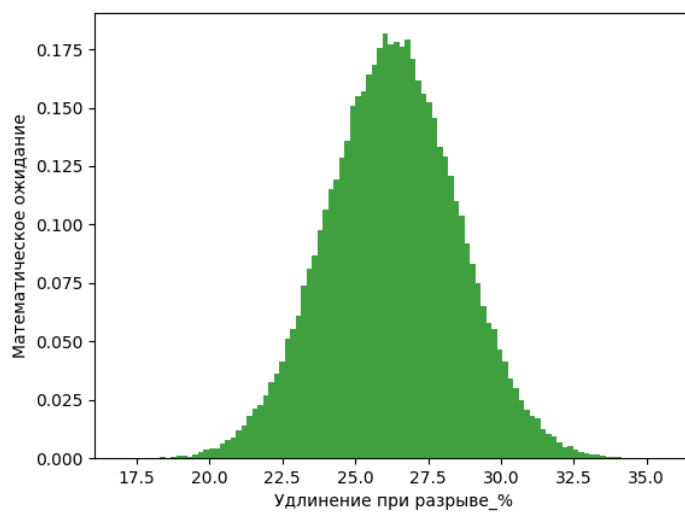


Рисунок 15. Нормальное распределение результатов измерения деформации нити

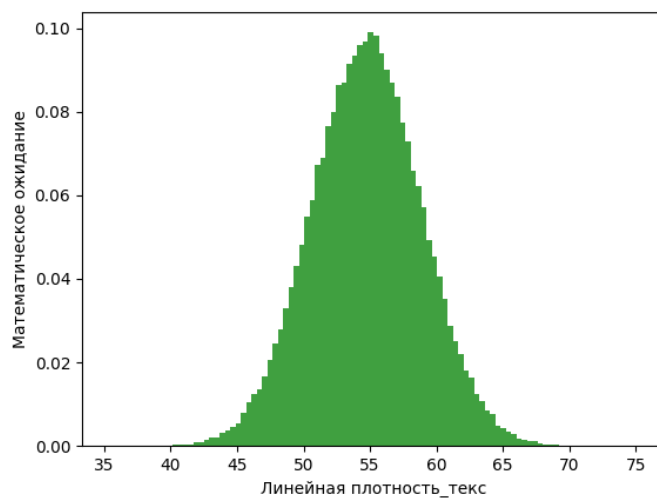


Рисунок 16. Нормальное распределение результатов расчета удельной разрывной нагрузки

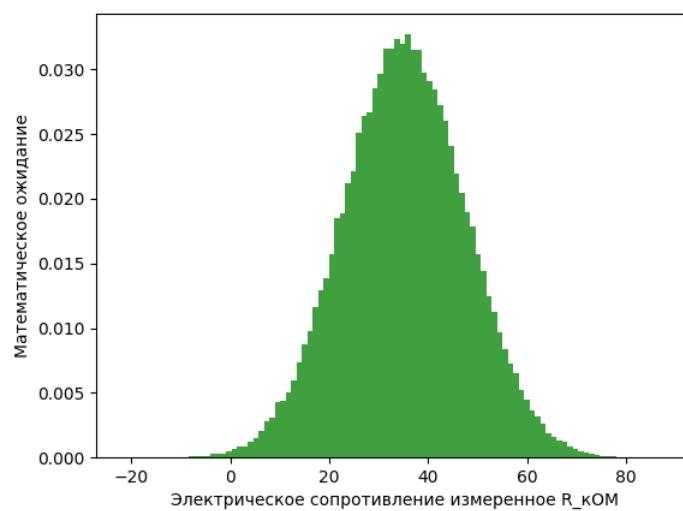


Рисунок 17. Нормальное распределение результатов измерения электрического сопротивления

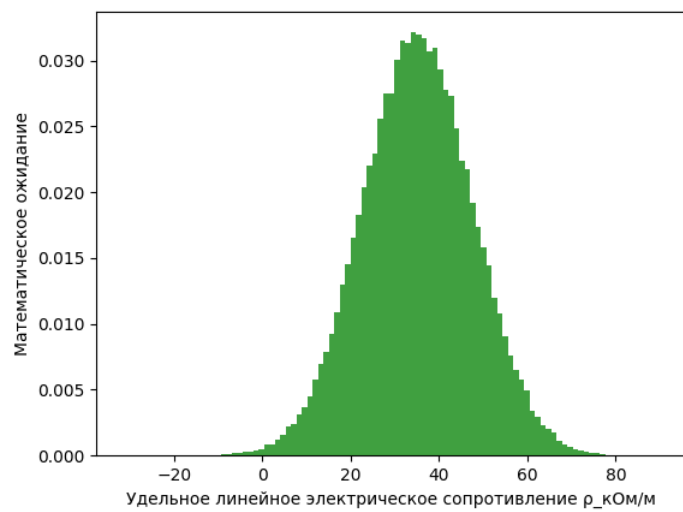


Рисунок 18. Нормальное распределение результатов расчёта удельного линейного электрического сопротивления

Заключение

Полученные результаты однозначно демонстрируют возможность эффективного использования методов статистического моделирования для получения нормального распределения произвольной измеряемой величины на основании ограниченного количества результатов прямых или косвенных измерений. Полученные результаты могут в дальнейшем использоваться для применения к ним существующих методов статистического анализа, а также представления результатов исследования в общепринятом формате.

В ходе выполнения исследования было показано, что методы статистического моделирования могут применяться к результатам измерения физических и механических параметров полиамидной электропроводящей мононити AMPERETEX. Получены нормальные распределения линейной плотности нити, силы разрыва нити, деформации нити, удельной разрывной нагрузки, электрического сопротивления и удельного линейного электрического сопротивления. В дальнейшем эти же методы могут быть применены к измерению иных параметров мононитей, а также использоваться для анализа результатов измерений других типов умных материалов.

Возможным расширением настоящего исследование является его обобщение на случай многомерного нормального распределения, которое может использоваться для построения распределений параметров, определённых на плоскости или в объёме.