

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН

Науман Дмитрий Сергеевич dima_nau@list.ru

Науман Людмила Владимировна luda_nau@mail.ru

Аннотация:

В статье представлена информация, связанная с исследованием физических и механических характеристик арамидного СВМ волокна, применяемого в конструкции изоляции электрических машин, рассмотрены преимущества арамидных волокон по сравнению со стекловолокном, определены характеристические параметры нити и ткани, определен коэффициент трения при трении нити в петле, исследована способность поглощать энергию удара при трении нитей между собой. Приведен расчет коэффициента трения с помощью формулы Эйлера для трения нити по цилиндрической поверхности. Также проведена оценка силы трения методом вытягивания нити и экспериментальное определение коэффициента трения скольжения. Исследовано влияние пропитки нитей и ткани связующими добавками на варьирование коэффициент трения, что дает возможность создания электроизоляционных материалов особого назначения с заранее заданными свойствами.

Ключевые слова: арамидное волокно, трансформатор, коэффициент трения, изоляция, исследование.

Важными достоинствами сухих трансформаторов, по сравнению с масляными, является их более высокая производственная и эксплуатационная технологичность, простота конструкции и низкая пожароопасность. Трансформаторы данного типа могут быть изготовлены как в открытом, так и закрытом, защищенном специальным металлическим кожухом исполнении.

Особенности конструкции сухих трансформаторов зависят от множества факторов, но главным требованием в большинстве случаев является обеспечение высоких физико-механических свойств электрической изоляции обмоток. Именно по этой причине сухие трансформаторы, как правило, устанавливают в помещениях с невысокой влажностью, малой запыленностью и небольшими перепадами температуры. Кроме того, из-за малой тепловой постоянной времени, перегрузочная способность у сухих трансформаторов намного меньше, чем у масляных.

К силовым трансформаторам распределительных сетей предъявляются достаточно жесткие требования как по эксплуатационно-техническим характеристикам, так и по надежности. Но, сегодня, если рассматривать сухие трансформаторы на напряжение 6 и 10 кВ, то здесь достаточно часто можно встретить оборудование, которое изготовлено с использованием устаревших электроизоляционных материалов. Поэтому, качество изоляции обмоток, которое зависит от используемых материалов и технологий изготовления, во многом и определяет не только все его характеристики, но и основные потребительские свойства.

В этой связи, исследование физико-механических характеристик изоляции обмоток сухих силовых трансформаторов, в конструкции которых используются новые, современные электроизоляционные материалы, является актуальным.

Исследования, целью которых является совершенствование электроизоляционных материалов, сводятся в основном к оптимизации тепловых режимов обмотки, особенно эта проблема касается электрических машин с воздушным охлаждением, сухих трансформаторов и асинхронных электродвигателей. Так, например, увеличение допустимой рабочей температуры обмотки требует уменьшения толщины корпусной изоляции, но это, в свою очередь, влечёт за собой снижение диэлектрических и физико-механических свойств применяемого электроизоляционного материала.

Как показывают результаты исследований систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин, увеличить допустимую рабочую температуру можно путем применения корпусной изоляционной ленты на основе арамидного волокна. Этот материал способен сохранять стабильные геометрические размеры и высокую прочность в сочетании с эластичностью при рабочих температурах от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $400 \dots 450\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом, важен ещё и тот факт, что материалы на основе арамидных волокон, не выделяют в процессе нагревания вредных испарений, дыма или газов [1].

Арамидная изоляция – это синтетический материал, обладающий высокой электрической и механической прочностью, высокой натрвостойкостью, и не поддерживают горение. Использование такой изоляции в конструкции обмоток позволяет трансформаторам выдерживать перегрузки по температуре до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. Применяется арамидная изоляция и в масляных трансформаторах, где повышение рабочей температуры обмотки позволяет при тех же размерах увеличить мощность трансформатора.

Материалы на основе арамидных волокон имеют ряд преимуществ по сравнению с материалами, основой которых являются стеклонити. Так, например, арамидная нить несколько меньше в диаметре и легче в сравнении со стеклонитью, имеют двухкратный запас прочности на разрыв по отношению к максимально допустимым нагрузкам, и, что самое важное - меньше подвержены воздействию температуры. Поэтому разработка и усовершенствование методов исследования физико-механических и поверхностных свойств арамидных волокон в настоящее время является перспективным направлением [2].

В данной работе в качестве объекта исследования было выбрано арамидное СВМ волокно, которое представляет собой высокопрочный и легкий материал.

Выбор СВМ волокна обусловлен высокими показателями прочности, упругости, а также стойкостью к высоким температурам в сравнении с другими волокнами. Наиболее перспективными являются органические волокна типа СВМ: арамос и терлон. Высокая прочность материала обеспечивается одинаковой направленностью молекул этого вещества. В таблице 1 представлены механические свойства органических волокон ($1\text{ ГПа} = 10^4\text{ кгс/см}^2 = 10^2\text{ кгс/мм}^2$) и стали.

СВМ волокна сохраняют свои свойства при пропитке их связующими и в процессе механической и текстильной обработки. Они обладают хорошей адгезионной прочностью к различным связующим. Арамидные волокна устойчивы к

действию различных растворителей, продуктов нефтепереработки, смол и воды, с кислотами и щелочами взаимодействуют только при повышенных концентрациях и температурах.

Таблица 1 – Механические свойства синтетических волокон

Волокно	ρ , кг/м ³	σ_b , ГПа	\mathcal{E} , %	E , ГПа
Полибензоамидное (Кевлар-49)	1,45-1,47	3,7÷4,0	1÷4	120÷140
Полиамидногидразидное (Х-500)	1,45-1,46	2,00÷2,25	3÷4	86÷106
Арамидное (Терлон)	1,39-1,40	1,17÷1,46	1,0÷1,5	85÷120
Арамидное (СВМ)	1,45-1,46	3,5÷4,0	2÷4	120÷130
Углеводородное высокопрочное	1700÷2000	2,0÷3,5	0,5÷0,8	200÷600
Сталь	7700	0,33	-	144

Примечания: ρ - плотность; σ_b - прочность при растяжении; \mathcal{E} – относительное удлинение; E - модуль упругости.

Нами определены характеристические параметры нити и ткани:

- 1) площадь поперечного сечения жгута составила 0,02 мм²;
- 2) толщина отдельной нити - 0,0084 мм;
- 3) число нитей в жгуте согласно составляет примерно 2300;
- 4) поверхность, структура ткани (рисунок 1) обследована с помощью оптического микроскопа;
- 5) износ нити до и после разрыва исследовались с помощью микроскопических наблюдений (рисунок 2).

При эксплуатации изделий на основе переработанных текстильных нитей в тканые, композиционные и электроизоляционные материалы важную роль играет трение. Так как важным свойством арамидных материалов является их способность поглощать энергию удара при трении нитей между собой, то определение оптимального коэффициента трения считается важной задачей. Слишком высокое значение силы трения приведет к тому, что нити ткани будут разрушаться до того, как произойдет поглощение энергии удара и ее рассеяние вследствие их трения, а при слишком низком значении нити будут скользить в структуре ткани и раздвигаться, что также снижает эффективность поглощения энергии. Из-за этой способности арамидные материалы применяются для изготовления изделий баллистической защиты и специальной одежды [3].

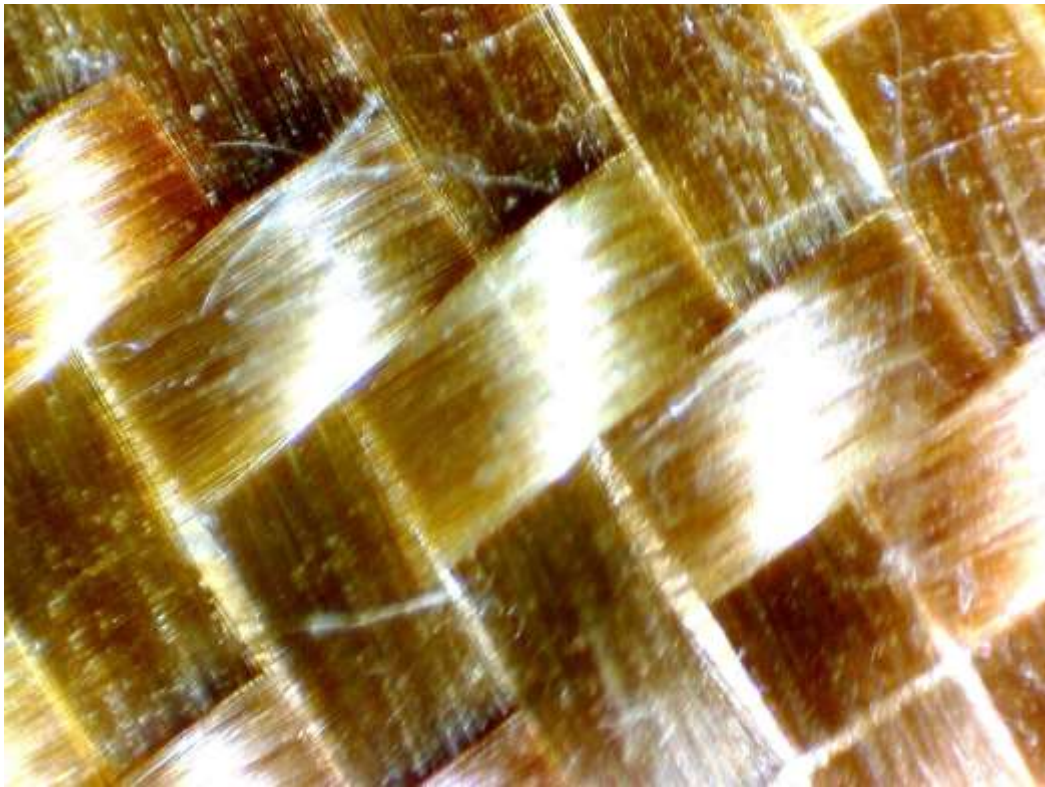


Рисунок 1 – Фото арамидной ткани (10-кратное увеличение)

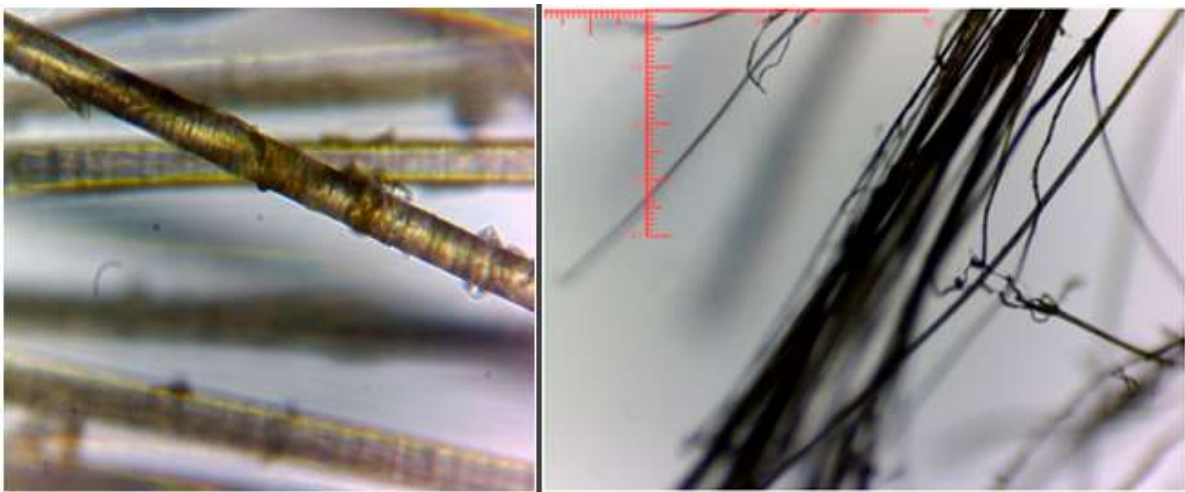


Рисунок 2 – Фотография арамидного волокна до и после разрыва (40-кратное увеличение)

В работе используется простая методика, основанная на прямом определении коэффициента трения при трении нити в петле. Расчет коэффициента трения проводился по формуле Эйлера для трения нити по цилиндрической поверхности.

Для определения коэффициента трения нити о нить изготовлена установка, показанная на рисунке 3.

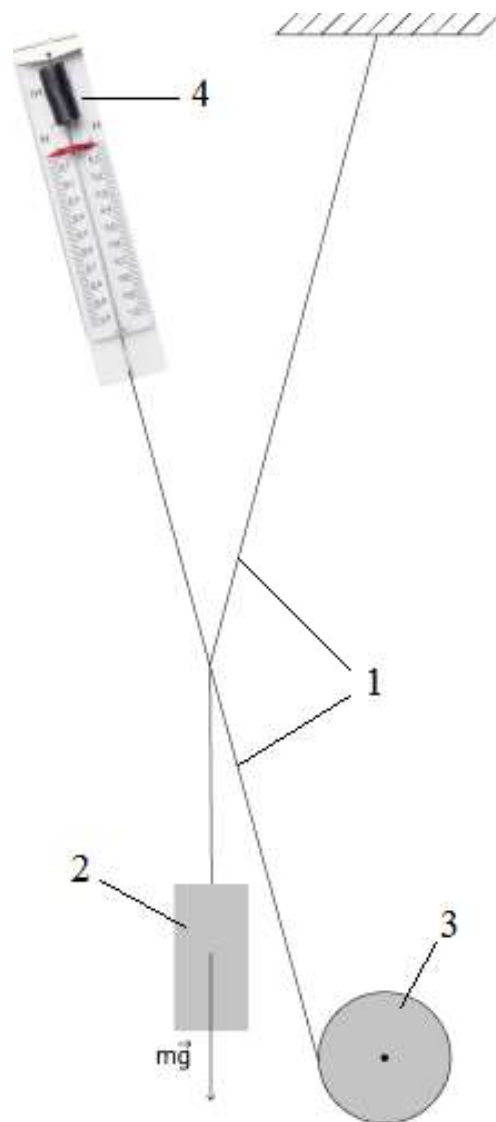


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки:

1 – арамидная нить; 2 – нагрузка; 3 – вращающийся блок; 4 – динамометр

Первая нить одним концом прикрепляется к неподвижной перекладине, другим – к динамометру. Через образовавшуюся петлю пропускается вторую нить, которая прикрепляется одним концом к вращающемуся блоку. К другому концу нити прикреплялся груз массой 20 г, скорость движения груза 2 см/мин. После чего проводится эксперимент и рассчитывается коэффициент трения. Расчет коэффициента трения нити μ проводится по значению силы ее натяжения до зоны трения F_1 и после неё F_2 с учетом угла охвата (нити) цилиндра α :

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{F_2}{F_1}. \quad (1)$$

В данном случае угол охвата нити $\alpha = \pi$.

На рисунке 4 иллюстрируется действие сил трения \vec{F}_1 и \vec{F}_2 при вращении блока по часовой стрелке а) и против неё - б).

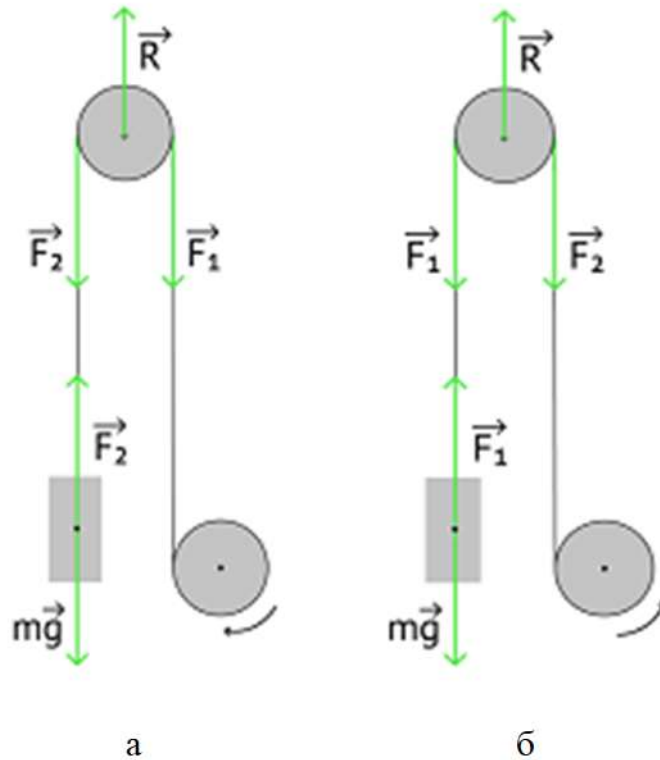


Рисунок 4 – Распределение сил трения в нити до и после зоны нагрузки при вращении блока: а – по часовой стрелке; б – против часовой стрелки

При вращении блока против часовой стрелки груз поднимается вверх, значения сил F_1 и F_2 , с учетом формулы Эйлера можно выразить следующим образом:

$$F_1 = mg, \quad (2)$$

$$F_2 = F_1 e^{\mu\pi}. \quad (3)$$

Равнодействующая этих сил:

$$\vec{R}' = \vec{F}_1 + \vec{F}_2. \quad (4)$$

Силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 сонаправлены, поэтому величину равнодействующей силы находим как алгебраическую сумму:

$$R' = F_1 + F_2. \quad (5)$$

Подставляя (2) и (3) в выражение (5), приходим к соотношению:

$$R' = mg + mge^{\mu\pi} \text{ или } R' = mg(1 + e^{\mu\pi}). \quad (6)$$

На рисунке 7 показано распределение результирующих сил.

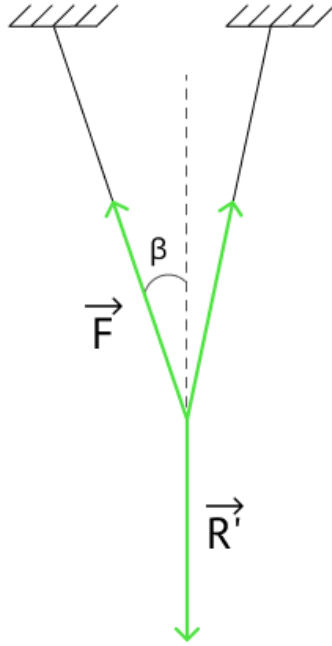


Рисунок 5 – Распределение результирующих сил

Согласно третьему закону Ньютона: $|R| = |R'|$. Из рисунка 5 следует, что:

$$2F \cos \beta = R'. \quad (7)$$

Приравнивая выражения (6) и (7), получим:

$$2F \cos \beta = mg(1 + e^{\mu\pi}). \quad (8)$$

Откуда

$$e^{\mu\pi} = \frac{2F \cos \beta}{mg} - 1 \text{ или } \mu\pi = \ln \frac{2F \cos \beta}{mg} - 1. \quad (9)$$

Так как угол β – мал, то $\cos \beta \approx 1$. С учетом этого получаем рабочую формулу для определения коэффициента трения нити о нить при вращения блока против часовой стрелки:

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{2F}{mg} - 1 \right). \quad (10)$$

При вращении блока по часовой стрелке, груз опускается вниз. При движении системы в противоположную сторону приходим к выражению:

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{mg}{2F - mg} \right). \quad (11)$$

В работе рассчитывалось среднее значение коэффициента трения при движении системы в разные стороны.

Ниже приводятся результаты экспериментального определения коэффициента трения скольжения и оценка силы трения методом вытягивания нити.

Важным свойством арамидных материалов является их способность поглощать не только энергию удара, но и постоянное трение. Это особенно важно при использовании арамидных материалов в конструкции изоляции электрических машин, которая испытывает физико-механические нагрузки под воздействием вибраций частотой в 50 Гц.

Для повышения надёжности арамидной изоляции, необходимо подобрать оптимальное плетение нитей, пропитку ткани, а также изучить трение нитей друг о друга, чтобы при эксплуатации изделий ткани не начали разрушаться раньше, чем произойдет поглощение энергии удара или нити не начали скользить и раздвигаться в структуре ткани.

В данной работе были проведены измерения нагрузки при вытягивании нитей из образцов арамидной ткани. При равномерном без рывков движении нити, нагрузка, прикладываемая к образцу, определяет значение силы трения скольжения нити о нить в материале. Максимальная нагрузка характеризует максимальное значение силы трения покоя, при которой начинается скольжение нити в образце [4].

Определение нагрузки, прикладываемой к отдельной нити для вытягивания из куска материала, производилось на образцах ткани 100×100 мм. Края образца со всех сторон обрезались и освобождался свободный край для обеспечения равномерного, без застревания, движения нити.

На рисунке 6 представлены результаты испытаний «нагрузка - относительное перемещение» при вытягивании нити из ткани с саржевым переплетением.



Рисунок 6 – Кривая зависимости «нагрузка – относительное перемещение» при вытягивании нити из образца

График зависимости прикладываемой нагрузки от относительного перемещения нити в образце имеет два выраженных участка. Вплоть до перемещения 7-8 % наблюдается возрастание нагрузки, далее по достижении максимального значения прикладываемой силы $\sim 6-7$ Н наблюдается резкое уменьшение нагрузки до нуля при полной вытяжке нити из образца. По-видимому, на первом участке нить выпрямляется, и свободный конец еще не подвижен, наблюдается нарастание силы трения в образце, далее нить начинает двигаться. На графике виден участок, когда значение прикладываемой нагрузки (трение скольжения) практически не изменяется, т.е. наблюдается равномерное скольжение нити в образце.

Для анализа усилия, прикладываемого к нити при вытягивании, была построена столбчатая диаграмма средней по образцу нагрузки, позволяющая визуально оценить максимальное и минимальное значения силы трения скольжения нити при вытягивании. Диаграмма представлена на рисунке 7.

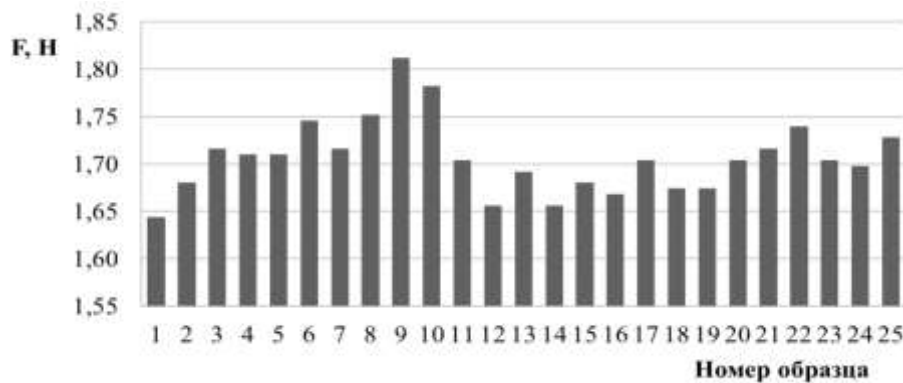


Рисунок 7 - Сила трения скольжения

Максимальное значение прикладываемого усилия составляет – 1,81 Н, минимальное – 1,64 Н. Среднее значение прикладываемого усилия к нити при вытягивании составляет – 1,71 Н.

Так же по полученным данным была построена гистограмма распределения нагрузки, представленная на рисунке 8.

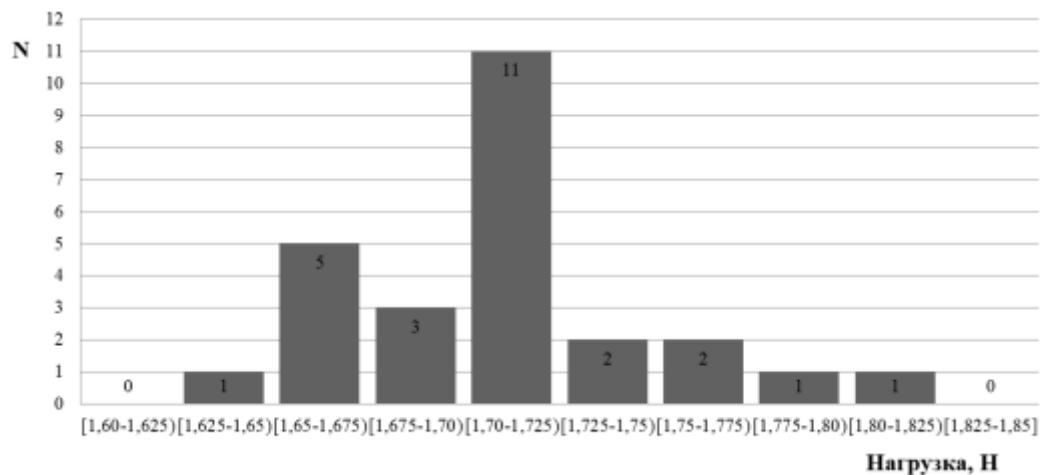


Рисунок 8 – Гистограмма распределения нагрузки

Ширина столбца гистограммы – 0,025 Н. Максимум распределения нагрузки лежит в интервале от 1,700 Н до 1,725 Н.

Для экспериментального определения коэффициента трения скольжения нити о нить был использована установка, описанная выше. Эксперимент был проведен для чистой арамидной нити, а также при модификации волокна водой и технической смазкой. По формулам (10) и (11) были рассчитаны коэффициенты трения скольжения нитей друг о друга. Полученные значения представлены в таблице 2.

Таблица 2– Значения коэффициентов трения

Коэффициент трения	Сухая нить	Влажная нить	Нить с технической смазкой
μ	0,22	0,28	0,20 – 0,35

При изучении трения арамидной нити о нить, было выявлено, что влияние смазки значительно изменяет значения коэффициента трения, который варьируется в зависимости от типа смазки в пределах от 0,20 до 0,35. При увлажнении коэффициент трения нити о нить возрастает на 30 %.

Заключение

1) Разработанный метод определения коэффициента трения может быть использован для комбинации нитей различных видов, что позволит создавать более прочные электроизоляционные ткани из разнородных нитей.

2) Установлено, что пропитка нитей и ткани связующими добавками позволяет варьировать коэффициент трения, что дает возможность создания материалов особого назначения с заранее заданными свойствами.

Полученные при выполнении данных исследований результаты могут быть использованы для повышения эксплуатационно-технических характеристик изоляции обмоток сухих силовых трансформаторов напряжением 6 и 10 кВ, которые применяются в распределительных сетях.

Список используемой литературы

1. Маннанов, Э. Р. О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы / Э. Р. Маннанов // *Материаловедение. Энергетика.* – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 42-67. – DOI 10.18721/JEST.27404. – EDN SFPPJQ.

2. Агапов, А. А. Усиление конструкций углеволокном в 21 веке / А. А. Агапов, С. М. Есипов // *Инновационная наука.* – 2023. – № 1-1. – С. 6-8. – EDN FTSRAX.

3. Маркин, В. Б. Радиационные процессы в технологии полимерных композиционных материалов / В. Б. Маркин, В. В. Воробей ; Министерство науки и образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И.

Ползунова». – Барнаул : Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. – 249 с. – ISBN 978-5-7568-1267-1. – EDN YWEBNJ.

4. Котомин, С. В. Трение высокопрочных арамидных нитей и методика его изучения / С. В. Котомин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 8(68). – С. 6. – DOI 10.18698/2308-6033-2017-8-1653. – EDN YUPNMP.

Информация об авторах

Науман Д. С. – студент группы 5031503/10002, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», РФ, г. Санкт-Петербург.

Науман Л. В. – к.ф.-м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», РФ, Алтайский край, г. Барнаул.