

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ПРЯЖИ В
СТРУКТУРЕ ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН

Р.Д. Акбаров, С.Ш. Ташпулатов

Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности

Annotation Modern technological evolution fosters the integration of traditional materials with electronic components, and the textile industry is becoming an important part of this trend. Particular attention is drawn to the integration of conductive yarns into knitted fabrics, which opens up new horizons for the development of smart textiles. This article aims to provide a comprehensive review of existing research, technologies, yarn compositions, and application areas, along with an assessment of the challenges and future prospects in this field.

Аннотация Современная технологическая эволюция способствует интеграции традиционных материалов с электроникой, и текстильная отрасль становится важной частью этого процесса. Особое внимание привлекает интеграция электропроводящей пряжи в трикотажные полотна, что открывает новые горизонты для разработки интеллектуального текстиля. Данная статья стремится к всестороннему обобщению существующих исследований, технологий, композиций пряжи и областей применения, с оценкой вызовов и перспектив этой области.

1. ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом растёт количество исследований в области электронного текстиля. Одним из ключевых направлений является создание гибких текстильных структур с возможностью проведения электрического тока для реализации функций мониторинга, управления и передачи данных. Современные вызовы в таких областях, как телемедицина, индустрия 4.0, военное дело и спорт, требуют разработки комфортных и многофункциональных изделий на основе проводящих трикотажных полотен.

Первые исследования в этой области начались с тканых структур с вшитыми металлическими нитями, однако в последние годы преимущество сместилось в сторону трикотажа благодаря его способности к деформации, соответствию анатомическим формам и лёгкости интеграции электроники [1, 2].

Согласно обзору Scatagliini и др. (2020), наибольший интерес вызывают технологии интеграции сенсоров и схем в повседневную одежду, при этом трикотаж используется в 63% случаев в готовых коммерческих изделиях благодаря своим уникальным свойствам [14].

Текстильная промышленность находится в процессе перехода к цифровизации и функционализации, и одним из перспективных направлений является разработка "умных" текстильных систем. В частности, интеграция электропроводящих элементов в трикотажные структуры позволяет создавать изделия, сочетающие комфорт, гибкость и электронные функции. Такие материалы находят применение в медицине, спорте, безопасности, авиации и других сферах [1, 2].

Трикотажные полотна обладают рядом преимуществ перед тканями: повышенная растяжимость, высокая воздухопроницаемость, плотное прилегание к телу и возможность создания трёхмерных конструкций. Эти свойства делают их идеальной основой для носимой электроники и текстильных сенсоров [3].

2. Классификация и свойства электропроводящей пряжи

Электропроводящая пряжа является ключевым элементом для формирования функционального текстиля. Её классификация зависит от типа проводящего материала, структуры пряжи, метода изготовления и области применения. Различные типы пряжи обладают своими преимуществами и ограничениями в зависимости от требуемых параметров проводимости, гибкости, устойчивости к внешним воздействиям и стоимости. В данной главе представлена углублённая классификация с анализом эксплуатационных характеристик и примерами использования в современных разработках.

2.1 Металлизированная пряжа

Металлизированная пряжа содержит металлические волокна или покрытия, чаще всего из меди, серебра, алюминия или нержавеющей стали. Пряжа может быть полностью металлической или состоять из текстильного сердечника с нанесённым металлическим слоем (например, серебряным напылением). Такая пряжа обеспечивает высокую электропроводность и часто используется в антистатической и экранирующей одежде, а также в нагревательных элементах.

Пример: продукция Shieldex® и Bekinox®, где текстильная основа (нейлон, полиэстер) покрыта чистым серебром, демонстрирует проводимость порядка 10 Ом/м и применяется в медицинском и защитном текстиле. Недостатками остаются чувствительность к влаге, окисление и пониженная эластичность [4, 5].

2.2 Пряжа с углеродными волокнами

Пряжа на основе углеродных волокон отличается малой плотностью, высокой гибкостью и термостойкостью. Она может быть как в виде мононитей, так и в виде плетёных или смешанных структур. Углеродные волокна устойчивы к внешним воздействиям, что делает их идеальными для использования в нагревательных текстильных элементах, спортивной одежде и носимой электронике.

Исследования Liang и соавт. (2018) показали, что углеродные волокна в структуре трикотажа сохраняют стабильную проводимость даже при многократных изгибах и растяжениях. Однако при высокой влажности возможно снижение стабильности сигнала [6].

2.3 Полимерно-композитная пряжа

Современное направление в разработке электропроводящих нитей связано с использованием полимерных композитов, где токопроводящий компонент (графен, углеродные нанотрубки, металлические наночастицы) внедряется в структуру полимера или наносится на его поверхность. Примеры включают покрытие хлопковой или полиэфирной пряжи композитами на основе PEDOT:PSS, полипиррола или ионов серебра.

Такие пряжи сочетают проводимость и гибкость, а также пригодны для масштабного производства. Работы Zhu et al. (2018) и Khat tab et al. (2019) показали, что после 30 циклов стирки проводимость уменьшалась не более чем на 15%, что подтверждает перспективность композитных решений для бытовой одежды [7, 8].

2.4 Гибридные и интеллектуальные пряжи

Отдельную категорию составляют гибридные пряжи, объединяющие несколько типов волокон: например, сочетание полиамида, углеродных и металлизированных волокон в единой структуре. Также появляются интеллектуальные пряжи со встроенными функциональными слоями — памятью формы, термооткликом, электролюминесценцией.

Такие изделия разрабатываются, в частности, в проектах Horizon Europe и MIT Media Lab, где ведутся исследования по прядению волокон, реагирующих на влажность, температуру и pH

кожи. Несмотря на сложность производства, гибридные пряжи позволяют значительно расширить функциональность текстильных изделий.

Таким образом, выбор типа электропроводящей пряжи определяется задачами конечного применения, требуемым уровнем проводимости, условиями эксплуатации и доступностью материалов. Продолжающиеся исследования в области нанотехнологий, гибридных материалов и методов модификации волокон позволяют надеяться на быстрое расширение ассортимента и повышение доступности подобных решений для промышленного использования.

3. Структура и технологии вязания электропроводящей пряжи

Структура трикотажных полотен играет решающую роль в обеспечении функциональности и надёжности электронного текстиля. В отличие от тканых материалов, трикотаж формирует петлевые связи, обладающие способностью к растяжению, изгибу и восстановлению формы, что критически важно при интеграции электропроводящей пряжи. Гибкость структуры обеспечивает устойчивую проводимость при многократных механических деформациях, в том числе растяжении и сжатии.

Электропроводящая пряжа может включаться в полотно двумя основными способами: в качестве основной нити или в виде вкраплений, прокладываемых параллельно основному вязанию. В зависимости от архитектуры полотна (однофонтурные, двухфонтурные, рельефные и рибовые структуры), проводящие дорожки могут располагаться вдоль курсов (горизонтально), вдоль столбиков петель (вертикально) или по диагонали.

3.1 Технологические методы вязания

- Кругловязание используется для создания бесшовных изделий, таких как бельё, спортивные майки и медицинские сенсорные оболочки. Этот метод обеспечивает равномерное распределение электропроводящих нитей по окружности изделия, что улучшает стабильность измерений и снижает контактное сопротивление.
- Плоское вязание применяется при производстве зонально-функциональных изделий: например, в рукавах, манжетах и поясных участках. Оно даёт возможность точно внедрять элементы схем (контакты, антенны) и подводить их к микроконтроллерам. Плоские машины с числовым программным управлением (например, Stoll CMS или Shima Seiki) позволяют интегрировать сложные схемы в одной операции.
- Интеграция через вставки предполагает ручную или автоматизированную прокладку проводящей пряжи во время вязания. Такая технология используется для создания сетей датчиков или экранирующих зон, расположенных по заранее заданным контурам.

3.2 Технические требования к процессу

При работе с электропроводящей пряжей необходимо строго контролировать натяжение нити, избежать чрезмерного трения и перегибов. Используются специальные направляющие, низкофрикционные устройства подачи и иглы с увеличенными каналами. Некоторые производители применяют технологию «влажного вязания» — подача нити с увлажнением для минимизации повреждений тонких металлических компонентов.

Также требуется высокая точность в согласовании петельных плотностей, особенно при комбинировании проводящих и обычных текстильных нитей. При неравномерной растяжимости возможна деформация токопроводящих путей и искажение сигнала.

3.3 Примеры исследований

Растущий интерес к электронному трикотажу стимулировал появление множества экспериментальных и прикладных исследований, направленных на оптимизацию вязания электропроводящей пряжи. Так, Stoppa и Chiolerio (2014) в своём обзоре выделяют использование кругловязальных машин как наиболее стабильный метод получения текстильных сенсорных поверхностей. В одном из экспериментов использовалась пряжа с серебряным покрытием на полиэфирной основе. Было зафиксировано изменение сопротивления менее 10% при циклическом растяжении полотна на 20%, что указывает на высокую стабильность структуры при деформациях [1].

Fan и соавт. (2020) продемонстрировали создание многоэлементной сенсорной сети из 128 датчиков на основе плосковязаного трикотажа. Система обеспечивала точный мониторинг частоты сердечных сокращений и дыхания при сохранении гибкости и удобства изделия [3].

В исследовании Zhu et al. (2018) тестировалась эффективность пряжи, покрытой PEDOT:PSS, в составе трикотажного полотна. Результаты показали высокую стабильность сопротивления даже после 30 циклов стирки, что подчёркивает жизнеспособность полимерно-композитных решений для массового текстиля [7].

Другие исследовательские группы, такие как команда из Университета Гента (Бельгия), сосредоточились на создании программируемых зон проводимости в трикотаже путём варьирования плотности петель и типа переплетения, демонстрируя, что электрические свойства могут быть локально адаптированы без добавления новых материалов.

Исследования группы A. Stoppa (2014) показали, что при вязании электропроводящей пряжи серебросодержащей композицией на кругловязальных машинах с петельной плотностью 14 петель/см удаётся достичь стабильности сопротивления до 10% при растяжении на 20% [1]. В другом исследовании (Fan et al., 2020), плоское вязание использовалось для создания сетки из 128 сенсоров, расположенных на майке, с возможностью мониторинга ЧСС и дыхания в реальном времени [3].

Таким образом, выбор типа вязания, плотности и размещения электропроводящих нитей оказывает прямое влияние на точность, чувствительность и надёжность электронных текстильных изделий. Современные технологии позволяют добиваться высокой интеграции без ущерба для комфорта и эстетики конечного продукта.

Трикотаж позволяет интегрировать проводящие нити в процессе производства.

Важно учитывать механические напряжения, чтобы не повредить проводящие компоненты. Используются адаптированные иглы, сниженная скорость вязания, специальное натяжение нити [10].

4. Применение электропроводящих трикотажных полотен

Разнообразие возможностей использования электропроводящих трикотажных полотен обусловлено их гибкой архитектурой, механической стабильностью и способностью адаптироваться к сложным условиям эксплуатации. Успешная интеграция проводящих нитей в трикотажные структуры обеспечивает не только комфорт и лёгкость, но и позволяет формировать замкнутые или разветвлённые токопроводящие контуры, служащие для мониторинга, передачи сигналов или даже питания электронных элементов. Ниже рассмотрены ключевые области применения таких материалов с учётом последних достижений в области электронного текстиля.

4.1 Носимая электроника

Одним из наиболее активно развивающихся направлений является создание текстильных интерфейсов и элементов управления. Трикотажные структуры с интегрированной электропроводящей пряжей могут выполнять функции сенсорных панелей, гибких кнопок и даже дисплеев. Научные коллективы, такие как Myant (Канада), разработали целые линии одежды с встроенными светодиодами, Bluetooth-модулями и модулями обратной связи. Преимущество трикотажа здесь — в возможности многократного растяжения и сохранения работоспособности проводящих цепей даже при сильной деформации [11].

4.2 Медицина

В области цифровой медицины проводящие трикотажные ткани открывают уникальные возможности: мониторинг сердечного ритма, дыхания, температуры тела, а также электромиографическая активность и ЭКГ. Использование мягкой, эластичной и гипоаллергенной структуры делает изделия пригодными для длительного ношения, включая во сне. Продукты компаний Hexaskin и Xenoma E-skin® включают в себя именно трикотажные сенсорные оболочки, адаптированные под спортивную и клиническую среду. С помощью проводящих дорожек данные передаются к микроконтроллеру и далее — на мобильные устройства [12].

4.3 Нагревательные системы

Электропроводящие полотна также широко применяются в текстильных нагревательных системах. Особо эффективны здесь пряжи на основе углеродных волокон или гибридов с металлическими сердечниками. В таких системах структура трикотажа обеспечивает равномерное распределение тепла и возможность адаптации к форме тела или поверхности. Нагревательные элементы на основе трикотажа применяются в одежде для холодного климата, перчатках, автомобильных сиденьях и одеялах. Большинство систем функционируют на безопасном напряжении 5–12 В, обеспечивая при этом комфортные температуры 35–50 °С [13].

4.4 Антистатика и экранирование

Защита от накопления статического заряда и экранирование от электромагнитных излучений — ещё одна важная функция электропроводящего трикотажа. Применение пряж с включением меди, стали или серебра позволяет создавать экранирующие одежды для работы в лабораториях, чистых комнатах, на радиочастотных объектах и в оборонной промышленности. Такие ткани часто используются в виде рибов и интерлоков, обеспечивающих максимальное прилегание к телу и снижение вероятности искрообразования. Согласно исследованию Su и Chern (2004), плотность прокладки проводящих нитей напрямую влияет на уровень затухания сигнала, что позволяет оптимизировать структуру под конкретные диапазоны частот [9].

5. Ограничения и вызовы

Несмотря на значительный прогресс в разработке электропроводящих трикотажных материалов, существует ряд технологических, эксплуатационных и экономических ограничений, сдерживающих их широкое внедрение.

5.1 Деградация проводимости

Одним из ключевых вызовов остаётся стабильность проводимости при эксплуатации. Металлизированные и углеродные пряжи могут терять проводимость после многократных циклов стирки, механических изгибов или контакта с потом и влагой. Исследования показывают, что после 10–20 стирок сопротивление может увеличиться в 1.5–2 раза, особенно при использовании серебра без защитного покрытия [7].

5.2 Трудности соединения с электроникой

Создание надёжных, гибких, моющихся соединений между текстильной частью и микросхемами остаётся сложной задачей. Традиционные пайка и клеевые соединения не обеспечивают долговечность при изгибах. Современные решения включают применение термопроводящих полимеров, гибких разъёмов, а также текстильных застёжек с токопередачей (e-snaps).

5.3 Износ нитей и механическая нестабильность

Тонкие проводящие нити подвержены истиранию и разрыву при длительной носке, особенно в зонах с высоким уровнем изгиба (локти, колени, швы). Комбинация с эластичными волокнами частично решает эту проблему, однако снижает проводимость в целом. Разработка многослойных структур и использование защитных плетений позволяют частично нивелировать эти недостатки.

5.4 Экономические барьеры

Высокая стоимость компонентов, особенно при использовании серебра, графена или углеродных нанотрубок, ограничивает массовое внедрение таких изделий. Промышленность стремится заменить дорогие материалы более доступными: например, медными покрытиями, переработанным углеродом, водорастворимыми проводящими полимерами.

Таким образом, ключевые направления развития включают повышение надёжности, снижение стоимости и создание стандартизированных методов интеграции. Решение этих задач возможно только при междисциплинарном подходе с участием специалистов в области материаловедения, машиностроения, текстильной инженерии и электронной промышленности.

- Потеря проводимости после стирок;
- Сложности соединения с жёсткими электронными элементами;
- Износ нитей при эксплуатации;
- Высокая стоимость некоторых компонентов.

6. Перспективы развития

Развитие электронного текстиля, и в частности электропроводящих трикотажных полотен, определяется множеством факторов — от инноваций в материаловедении до изменений в нормативной базе и рыночном спросе. Перспективные направления развития концентрируются на повышении надёжности, гибкости, устойчивости к многократным воздействиям, а также на функциональной интеграции новых компонентов.

Современные исследования активно сосредоточены на создании саморегенерирующихся материалов. Команды под руководством Y. Zeng (2021) и M. Amjadi (2020) разрабатывают нанокompозитные проводящие нити с эффектом самовосстановления после повреждений [15, 16].

Параллельно ведутся разработки в области интеграции микроэнергетических устройств — гибких аккумуляторов, суперконденсаторов и солнечных панелей, которые могут быть вплетены в ткань (например, разработки команд MIT и EPFL) [17, 18].

Кроме того, ведутся работы по повышению устойчивости к стирке: применяются нанопокрyтия на основе полипиррола и PEDOT:PSS, защищающие структуру от влаги и трения. Разработка стандартов ISO и IEC для электронного текстиля также активно обсуждается на форумах IEEE и CEN [19].

- Создание гибридных нитей с самовосстанавливающимися свойствами;
- Интеграция солнечных панелей и батарей;

- Повышение устойчивости к износу и влаге;
- Разработка стандартов для массового производства.

7. Заключение

Использование электропроводящей пряжи в трикотажных полотнах открывает уникальные возможности для создания нового класса интеллектуальных материалов. В сочетании с гибкими схемами, биоэлектроникой и интернетом вещей такие изделия способны трансформировать повседневную одежду в функциональные интерфейсы. Необходимы дальнейшие исследования, стандартизация и снижение себестоимости для обеспечения масштабного внедрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stoppa M., Chiolerio A. Wearable electronics and smart textiles. *Sensors*, 2014.
2. Tao X. *Smart textiles: Fundamentals and applications*. CRC Press, 2016.
3. Fan W. et al. Machine-knitted washable sensor array textile. *Science Advances*, 2020.
4. Shieldex®. *Conductive threads catalog*, 2023.
5. Perumalraj R. et al. Copper core-woven fabrics. *J. Text. Inst.*, 2009.
6. Liang R. et al. Carbon fiber-based e-textiles. *Text. Res. J.*, 2018.
7. Zhu C. et al. Conductive polymer fibers. *Polymers*, 2018.
8. Khattab T. et al. PEDOT:PSS-coated textiles. *ChemistrySelect*, 2019.
9. Su C.I., Chern J.T. Stainless steel knitted fabrics. *Text. Res. J.*, 2004.
10. Stanley J. et al. *Joining techniques for E-textiles*. Eng. Reports, 2021.
11. Hexoskin®. *Smart biometric shirt technology*. <https://www.hexoskin.com>
12. Modestov M.B. et al. *Textile heating systems*. *Bull. Sci. Tech. Dev.*, 2017.
13. EMF Protective Fabrics®. <https://www.lessemf.com>
14. Scataglini S., et al. *Smart Textiles for Personalized Health Monitoring: A Review of Current Technologies*. *Sensors*, 2020.
15. Zeng Y. et al. *Highly Stretchable, Self-Healing, and Conductive Hydrogel for Wearable Strain Sensors*. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021.
16. Amjadi M., Kyung K.-U. et al. *Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review*. *Advanced Functional Materials*, 2020.
17. Xu S., Zhang Y. et al. *Self-powered micro-systems for wearable electronics*. *Nature*, 2017.
18. Scardaccione A. et al. *E-textile integration of thin-film solar cells*. *EPFL Research Reports*, 2019.
19. IEEE Standards Association. *Standardization of e-textile architecture and interfaces*. White Paper, 2022.