

**UWARUNKOWANIA PODEJMOWANIA
DECYZJI MENEDŻERSKICH
W PRZEDSIĘBIORSTWIE SEKTORA ODZIEŻOWEGO**
zgodnych z koncepcjami
**SMART TEXTILES, ELECTRONIC TEXTILES,
INTERNET OF TEXTILE THINGS**

Marzena Jankowska-Mihułowicz
Grzegorz Laskowski



**OFICyna
WYDAWNICZA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

R e c e n z e n t

dr Elżbieta SZCZYGIEŁ – Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie,
Katedra Przedsiębiorczości i Innowacji Społecznych

R e d a k t o r n a c z e l n y

Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
dr hab. inż. Lesław GNIEWEK, prof. PRZ

A u t o r z y

dr inż. Marzena JANKOWSKA-MIHUŁOWICZ
Politechnika Rzeszowska, Wydział Zarządzania
Grzegorz LASKOWSKI
Dyrektor ds. projektu RFID, ESOTIQ & Henderson S.A.

W procesie wydawniczym pominięto etap opracowania redakcyjnego.
Druk z matryc dostarczonych przez Autorów.

P r o j e k t o k ł a d k i

Joanna MIKUŁA

Monografia ta jest wynikiem prac badawczych prowadzonych w ramach projektu realizowanego dla ESOTIQ & Henderson S.A. (ul. Szybowcowa 8A, 80-298 Gdańsk, NIP: 583-31-17-220, REGON: 221133543).

Zadanie realizowane w Katedrze Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych Politechniki Rzeszowskiej (ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów): „Badania nad opracowaniem struktury tekstronicznej stanowiącej pasywny elektroniczny identyfikator RFID, zaprojektowany do integracji z gotowym wyrobem branży odzieżowej ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki wyrobów bieliźniarskich”.

Zadanie realizowane w Zakładzie Zarządzania Przedsiębiorstwem: „Badanie uwarunkowań podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwie z branży odzieżowej, zgodnych z koncepcjami smart textiles, electronic textiles, Internet of Textile Things”.

*uwarunkowania decyzyjne, przedsiębiorstwo, sektor, odzież, inteligentne tekstylia, elektroniczne tekstylia, Internet produktów sektora tekstylnego, urządzenia ubieralne
decision-making conditions, company, sector, clothes, smart textiles,
electronic textiles, Internet of Textile Things, wearables,*

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
Rzeszów 2023

Spis treści

WSTĘP	5
1. OPIS BADAŃ	8
2. PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH POJĘĆ	11
2.1. Inteligentne tekstylia	11
2.2. Tekstronika i tekstylia elektroniczne	13
2.3. Internet produktów sektora tekstylnego	16
3. POTENCJALNE ZASTOSOWANIA INTELIGENTNYCH TEKSTYLIÓW W SEKTORZE ODZIEŻOWYM	21
3.1. Opis sekcji tematycznych przeglądu literatury	21
3.2. Zaawansowana elektronika, zasilanie i pomiary	22
3.3. Medycyna, sport i bezpieczeństwo	33
3.4. Ogrzewanie ciała i inne funkcje termiczne	41
3.5. Strong man, sztuczne mięśnie	44
3.6. Moda	45
3.7. Zrównoważony rozwój i przewaga konkurencyjna	47
4. PODSTAWY I KIERUNKI PODEJMOWANIA DECYZJI MENEDŻERSKICH – WNIOSKI Z BADAŃ	48
LITERATURA	60

Wstęp

Autorzy tej monografii wierzą, że najciekawsze projekty biznesowe i naukowe powstają na styku różnych nauk. Profesjonalnemu zarządzaniu przedsiębiorstwem sprzyja kooperacja menedżerów ze specjalistami reprezentującymi różne dyscypliny nauki, natomiast rozwój nauk o zarządzaniu i jakości jest możliwy dzięki współpracy naukowców z menedżerami.

Cel tego opracowania badawczego stanowi zidentyfikowanie przedmiotu i kierunków podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwie sektora odzieżowego, zgodnych z koncepcjami: *smart textiles* – inteligentnych tekstyliów, *electronic textiles* – elektronicznych tekstyliów oraz *Internet of Textile Things* – Internetu produktów sektora tekstylnego. W badaniach uwzględniono możliwości i bariery rozwoju tekstroniki oraz *wearables* – urządzeń ubieralnych. Opisane uwarunkowania decyzyjne dotyczą więc otoczenia technologicznego i części otoczenia sektorowego przedsiębiorstwa odzieżowego. Uzasadnieniem dla wyboru tematu tej monografii jest potrzeba identyfikacji uwarunkowań, które ułatwią decyzje menedżerskie skierowane na rozwój przedsiębiorstwa odzieżowego w obszarze Przemysłu 4.0, którego istotą jest połączenie systemów i inteligentnych maszyn, automatyzacja, wymiana danych oraz komunikacja z użytkownikami produktów i usług. Zagadnienia te są aktualne, ponieważ sprzyjają budowaniu konkurencyjnych modeli biznesowych. W tym opracowaniu badawczym zdefiniowano architekturę inspirujących wartości i kierunków działań przedsiębiorstwa odzieżowego, dzięki którym może ono zapewnić sobie przetrwanie i rozwój w określonym przedziale czasu lub w procesie ewolucji. Zaprezentowano koncepcję

wyrażającą logikę biznesową określania i tworzenia wartości użytkownikom odzieży wytworzonej z inteligentnych tekstyliów. W badaniach skoncentrowano się głównie na elementach architektury technologicznej potencjalnego modelu biznesu przedsiębiorstwa odzieżowego. Możliwości zastosowania architektury technologicznej zwiększają się, gdy w modelu biznesu przedsiębiorstwa jest odpowiednio rozwinięta architektura społeczna i inteligencja biznesowa (procesy biznesowe). Powoduje to intensyfikację transformacji cyfrowej tego przedsiębiorstwa. Cyfryzacja dynamicznie rozprzestrzenia się w organizacjach na całym świecie oraz przekształca przedsiębiorstwa, rynki i społeczeństwa. Wzajemne powiązania modeli biznesów przedsiębiorstw zwiększają złożoność środowiska, a konkurencja przenosi się na nowy poziom. Zignorowanie tych procesów przez menedżerów jest niebezpieczne. Warto więc monitorować otoczenie technologiczne i sektorowe oraz rozumieć uwarunkowania decyzyjne, jakie te obszary tworzą. Bo jak zauważył H. Jackson Brown Jr – „Szansa tańczy z tymi, którzy już są na parkiecie”. Jest to nawiązanie do działania decyzyjnych menedżerów, którzy przygotowują przedsiębiorstwa na inwestycje – te adaptacyjne i te wyznaczające nowe trendy na rynku odzieżowym.

W przeszłości, wytwarzanie odzieży kojarzyło się z pełnieniem funkcji projektanta ubrań, krawca czy pracowników szwalni. Po rozważeniu treści tej książki, zrozumiałe będzie, że w przyszłości taka załoga może okazać się niewystarczająca. Szansę na odniesienie sukcesu prawdopodobnie będą miały inteligentne podmioty sektora odzieżowego, które w zakresie produkcji podejmą interdyscyplinarną współpracę ze specjalistami z następujących dziedzin: Przemysł 4.0, inżynieria komputerowa, informatyka, telekomunikacja, elektronika, tekstylia,

materiałoznawstwo, nanotechnologia, tekstronika, futurystyka, etyka, logistyka, *Business Intelligence*, socjologia, media społecznościowe (ang. *social media*), zrównoważony rozwój, recykling, medycyna i inne. W nowoczesnym biznesie potrzebni są także specjaliści i liderzy międzydziedzinowi albo multi-dziedzinowi, cechujący się ciekawością świata, inteligencją, dużą wielo-obszarową wiedzą, zdolnością szybkiego uczenia się, a może przede wszystkim – zachwytem dla potencjału sieci ludzkich umysłów połączonych wspólną ideą.

Inteligentne ubrania powinny być estetycznie wykonane i piękne – to „eleganckie projekty, które naciskają wszystkie guziki fashionistek” (popularne określenie, oryginalnie brzmiące: “*sleek designs that press all the fashionistas’ buttons*”). Inteligentne ubrania powinny także zapewniać fizyczny komfort użytkownikom. Ponadto, przeznaczeniem opisywanych ubrań jest tworzenie wartości dodanej – zaspokajanie istotnych potrzeb ich właściciela. W intencji autorów, ta książka może stanowić inspirację głównie dla decydentów przedsiębiorstw odzieżowych, od których będzie zależało – czy takie inteligentne ubrania będą tworzone i znajdą nabywcę?

1. Opis badań

Badania przeprowadzono w okresie od 15 listopada 2021 roku do 15 kwietnia 2022 roku. Ich przedmiot stanowią uwarunkowania podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwie sektora odzieżowego, zgodnych z koncepcjami *smart textiles*, *electronic textiles*, *Internet of Textile Things*.

Celem badań było zidentyfikowanie przedmiotu i kierunków podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwie sektora odzieżowego, zgodnych z koncepcjami *smart textiles*, *electronic textiles*, *Internet of Textile Things* – z uwzględnieniem możliwości i barier w rozwoju tekstroniki, w oparciu o analizę stanu wiedzy w okresie prowadzenia badań.

Jako metodę badań zastosowano przegląd systematyczny. Jest to metoda gromadzenia dostępnej literatury naukowej w sposób systematyczny [1-2]. Ułatwia ona przeanalizowanie dokładnego stanu wiedzy w określonej dziedzinie oraz wyciąganie jasnych wniosków [3]. W badaniach skupiono się na zidentyfikowaniu podstaw podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwie sektora odzieżowego, z uwzględnieniem możliwości i barier w rozwoju tekstroniki. Przegląd systematyczny jest metodą badawczą pokazującą, w jaki sposób dane będą gromadzone, analizowane i prezentowane. Pierwszym krokiem było ustalenie kryteriów badania oraz wybór właściwych i aktualnych artykułów. Na tym etapie zgromadzono wyłącznie publikacje z lat 2020-2021 dostępne w bazie *Web of Science*. Drugi krok to poszukiwanie innych artykułów o treściach związanych z przedmiotem badań. Trzecim krokiem była ocena artykułów, a więc ustalenie ich przydatności do osiągnięcia celu

badan. W czwartym kroku przeanalizowano i skategoryzowano 106 wyselekcjonowanych publikacji z uwzględnieniem ich kontekstu sektorowego i aplikacyjnego.

Na pierwszym etapie przeglądu systematycznego zastosowano badanie bibliometryczne, które jest ugruntowaną formą metaanalitycznych badań literatury [4]. Analizie poddano teksty zwyselkcjonowane ze względu na występujące w nich słowa kluczowe związane z przedmiotem badań [5]. Pozwoliło to zidentyfikować artykuły powiązane z tematem badań [6]. Przyjmuje się, że badanie bibliometryczne może służyć do opisu, oceny i monitorowania stanu danego obszaru badawczego w czasie oraz do oceny metaanalitycznego rozwoju danego obszaru badawczego dla celu zidentyfikowania jego kluczowych elementów i podstawowych ram teoretycznych [7].

Ponadto, zastosowano metody analizy i syntezy (przyczynowej, logicznej) oraz podejście pozytywistyczne (dedukcję – myślenie od ogółu do szczegółu) i podejście fenomenologiczne (indukcję – myślenie od szczegółu do ogółu).

Zakres badań stanowią uwarunkowania występujące w otoczeniu technologicznym przedsiębiorstwa oraz częściowo, w jego otoczeniu branżowym. To opracowanie badawcze obejmuje pięć elementów strukturalnych. W pierwszej części, stanowiącej wprowadzenie do badań, wskazano ich okres, a także opisano ich przedmiot, cel, metody i zakres.

W drugiej części tego opracowania badawczego dokonano przeglądu podstawowych pojęć. Wyjaśniono istotę inteligentnych tekstyliów i przedstawiono ich trzy generacje: pasywne i aktywne inteligentne tekstylia oraz ultrainteligentne tekstylia. Wskazano na zastosowania inteligentnych tekstyliów w wojsku, służbie zdrowia, sporcie i modzie. Wyodrębniono

estetyczne, inteligentne tekstylia jako kategorię istotną dla sektora modowego, ze względu na pełnione funkcje użytkowe i wizualne. Następnie, zdefiniowano tekstronikę jako synergiczne połączenie przemysłu tekstylnego, elektronicznego i informatycznego. Kolejno, scharakteryzowano tekstylia elektroniczne. Przedstawiono elastyczność, inteligencję i wielofunkcyjność jako cechy produktu tekstronicznego, a także scharakteryzowano rynek *wearables* – (tzw. urządzeń ubieralnych) i jego potencjał rozwojowy. Drugą część badań kończy opis Internetu produktów sektora tekstylnego jako segmentu Internetu rzeczy i Internetu wszechrzeczy.

Trzecia część tego opracowania badawczego obejmuje przegląd literatury w zakresie potencjalnych zastosowań inteligentnych tekstyliów w sektorze odzieżowym, a więc w produkcji inteligentnych ubrań, z uwzględnieniem możliwości i barier w rozwoju tekstroniki, w oparciu o analizę stanu wiedzy do kwietnia 2022 roku. Przegląd ten ma na celu określić podstawy do wnioskowania w zakresie przedmiotu i kierunków podejmowania decyzji menedżerskich, w procesach inwestycyjnych, w przedsiębiorstwie sektora odzieżowego. Przegląd literatury podzielono na następujące sekcje tematyczne:

- a) zaawansowana elektronika, zasilanie i pomiary,
- b) medycyna, sport i bezpieczeństwo,
- c) ogrzewanie ciała i inne funkcje termiczne,
- d) *strong man*, sztuczne mięśnie,
- e) moda,
- f) zrównoważony rozwój i przewaga konkurencyjna.

W czwartej części tego opracowania zawarto wnioski z badań i ukierunkowanie dalszych prac.

W ostatniej, piątej części niniejszego opracowania zestawiono literaturę wykorzystaną w procesie badawczym.

2. Przegląd podstawowych pojęć

2.1. Inteligentne tekstylia

Inteligentne tekstylia (ang. *smart textiles*, *intelligent textiles*) to sektor przemysłu, który rozwinął się dzięki zastosowaniu nowych – względem konwencjonalnych, tradycyjnych – technologii, włókien i materiałów tekstylnych. Dlatego określa się je jako tekstylia nowej generacji [8]. Według kryterium właściwości użytkowych, inteligentne tekstylia dzieli się na trzy grupy i są to:

- a) pierwsza generacja – pasywne inteligentne tekstylia,
- b) druga generacja – aktywne inteligentne tekstylia,
- c) trzecia generacja – ultrainteligentne tekstylia.

Im wyższa jest generacja inteligentnych tekstyliów, tym ich własności użytkowe są większe i wymagają bardziej zaawansowanej współpracy z gałęziami nauki takimi jak np. nanotechnologia, materiałoznawstwo, elektronika, inżynieria komputerowa [8]. Jedną z dostępnych klasyfikacji inteligentnych tekstyliów, prezentującą ich generacyjne różnice, pokazano w tablicy 2.1.

Pasywne inteligentne tekstylia są tylko czujnikami, dlatego identyfikują warunki otoczenia. Z takich tekstyliów wytwarza się odzież chroniącą przed promieniowaniem UV, wodoodporną, odzież z włókien przewodzących prąd elektryczny i ubrania poddane obróbce plazmowej o różnych potencjalnych zastosowaniach [8].

Aktywne inteligentne tekstylia wyczuwają warunki otoczenia, a także reagują na nie. Konstrukcyjnie, pełnią one funkcje czujnika

i aktuatora. Z takich tekstyliów wytwarza się produkty chromowane, zmiennofazowe, termoregulowane (z funkcją magazynowania ciepła), z pamięcią kształtu i zawierające barwniki wrażliwe na ciepło [8].

Tabl. 2.1. Klasyfikacja inteligentnych tekstyliów [8]

	Wyczuwanie warunków zewnętrznych	Reagowanie na warunki zewnętrzne	Odpowiadanie na warunki zewnętrzne i adaptacja do nich
Pasywne inteligentne tekstylia	✓		
Aktywne inteligentne tekstylia	✓	✓	
Ultrainteligentne tekstylia	✓	✓	✓

Ultrainteligentne tekstylia wyczuwają warunki otoczenia, reagują na nie, a także monitorują i dostosowują się do bodźców lub warunków środowiskowych, takich jak źródła termiczne, mechaniczne, chemiczne, magnetyczne i inne. Produkt wytworzony z takiej tkaniny – analizując przez analogię – działa jak ludzki mózg, a więc posiada funkcje poznawcze, dokonuje rozróżnień i aktywacji. Przykładami opisywanych produktów są skafandry kosmiczne i kurtki muzyczne [8].

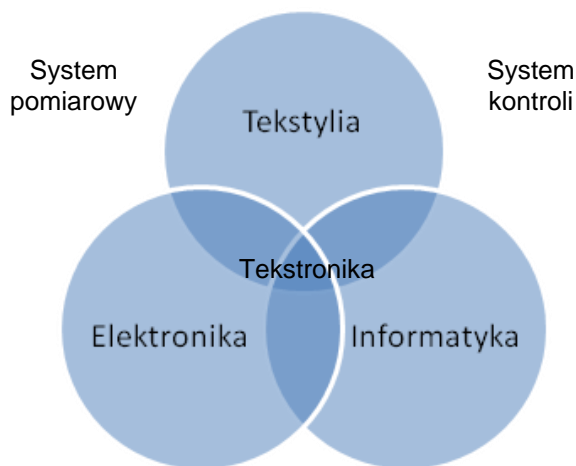
Dla sektora modowego ważne są funkcje użytkowa i estetyczna: „Estetyczne, inteligentne tekstylia wykorzystują technologię projektowania mody, ze względu na ich zdolność do rozjaśniania i zmiany koloru. Ubrania emitujące światło i świetliste sukienki są typowymi i komercyjnymi przykładami...” [8].

Inteligentne tekstylia są wydajne i funkcjonalne. Mają potencjał aplikacyjny w sektorach rynku takich jak: służba zdrowia, sport, wojsko i moda.

2.2. Tekstronika i tekstylia elektroniczne

Tekstronika (ang. *textronics*) stanowi interdyscyplinarne, podejście rozwijające się dynamicznie od 2000 roku, zakładające synergiczne połączenie trzech przemysłów (tekstylnego, elektronicznego i informatycznego) z elementami automatyki oraz wiedzy metrologicznej (Rys. 2.1). Podejście to jest stosowane podczas projektowania materiałów tekstylnych i ich wykorzystania w procesach produkcji [9].

Rys. 2.1. Tekstronika jako synergiczne połączenie trzech przemysłów [9]



Tekstronika jest dziedziną nauki, której celem jest projektowanie i wytwarzanie wielofunkcyjnych, inteligentnych produktów o złożonych strukturach wewnętrznych, które mają jednolite właściwości funkcjonalne.

Funkcjami produktu tekstronicznego są [9]:

- a) elastyczność – budowa łatwa do zmodyfikowania na etapach: projektowania, produkcji i eksploatacji (np. konstrukcja modułowa),
- b) inteligencja – możliwość automatycznej zmiany właściwości pod wpływem czynników zewnętrznych oraz możliwość podejmowania decyzji, uczenia się i/lub komunikacji z otoczeniem,
- c) wielofunkcyjność – łatwość realizowania różnych funkcji dzięki zastosowaniu inteligentnych i interaktywnych, a więc samodostosowujących się materiałów tekstylnych.

Rozwój tekstroniki umożliwił produkcję wyrobów tekstronicznych, a więc inteligentnych tekstyliów trzeciej generacji, określanych też jako ultrainteligentne tekstylia. Wyrób tekstroniczny to produkt sektora tekstylnego, z którym trwale zintegrowano strukturę tekstroniczną (np. RFID-tex – produkt branży tekstylnej, z którym w sposób trwały została zintegrowana struktura tekstroniczna z interfejsem RFID).

Tekstylia elektroniczne lub e-tekstylia (ang. *Electronic Textiles e-textiles*) to wyroby zawierające podłoża tkaninowe z elementami elektronicznymi, przewodzącymi prąd elektryczny – w tym z czujnikami do wykrywania i pomiaru wielości fizycznych, stanowiących dane użytkownika [10], które dodatkowo można zapisywać i przechowywać.

W tym opracowaniu badawczym, struktura tekstroniczna rozumiana jest jako materiał włókienniczy połączony trwale z komponentami elektrycznymi i/lub elektronicznymi. Struktura ta jest wyrobem tekstronicznym, określonym jako RFIDtex i stanowi obiekt oznaczony unikalnym, pasywnym identyfikatorem radiowym. Identyfikator ten można zintegrować z wyrobem (np. odzieżą) za pomocą technologii szycia,

haftowania, klejenia lub innych metod, technik i technologii produkcyjnych.

Współcześnie prowadzi się zaawansowane prace nad produkcją przemysłowych ilości inteligentnych tekstyliów, które są niedrogie i mają różnorodne zastosowania od odzieży roboczej dla określonych branż aż po odzież użytku osobistego. Inteligentne tekstylia pozwalają pozyskiwać i magazynować energię, mierzyć ciśnienie, porowatość i kolor. Mogą być wyposażone w czujniki ruchu, temperatury i chemikaliów. Pozwalają identyfikować, dokonywać pomiaru tych wartości fizycznych oraz monitorować ich zmienność. Wyzwania dla producentów inteligentnych tekstyliów stanowią wzrost wydajności produkcji i obniżenie jej kosztów [11].

Inteligentne ubrania z e-tekstyliów to część rynku *wearables*. W literaturze fachowej używa się określeń *wearables* lub *wearable devices*, co na język polski tłumaczy się jako urządzenia ubieralne, ubierane komputery, urządzenia do noszenia lub technologię do noszenia. *Wearables* oznaczają ubrania z ultrainteligentnych tekstyliów i akcesoria (np. biżuterię, nakrycia głowy, obuwie) zawierające w sobie komputer oraz zaawansowane elektronicznie. *Wearables* są przykładem implementacji Internetu rzeczy (*Internet of Things – IoT*), ponieważ stanowią część sieci obiektów fizycznych wyposażonych w elektronikę, czujniki i oprogramowanie, za pomocą których mogą łączyć się pomiędzy sobą, producentem i innymi użytkownikami, bez ingerencji człowieka. Jednymi z pierwszych *wearables* produkowanymi na masową skalę są akcesoria: inteligentne zegarki (ang. *smartwatches*) i inteligentne bransoletki (ang. *smartbandes*) umożliwiające pomiar podstawowych funkcji życiowych organizmu użytkownika i kontrolę jego aktywności fizycznej. Przykładami

wearables są także inteligentne okulary (ang. *smart glasses*). W rynek *wearables* zaangażowali się najwięksi światowi producenci elektroniki i odzieży tacy jak: Apple Inc. (USA), Fitbit Inc. (USA), Google LLC (USA), Samsung Electronics Co., Ltd. (Korea Południowa), Garmin International Inc. (Szwajcaria), LG (Korea Południowa), Huawei (Chiny), Sony Corporation (Japonia), Xiaomi Corporation (Chiny) i Microsoft (USA), Suunto (Finlandia), Abbott laboratories (USA), Medtronic (USA-Irlandia), Adidas AG (Niemcy), Nike Inc. (USA) [11-14].

Oszacowano, że globalny rynek *wearables* za 2021 rok miał wynieść 17,14 mld USD, i że w okresie 2022-2028 objętym prognozami, rynek ten wzrośnie o 45,4%. „Modyfikacja stylu życia, wzrost popularności w związku z urbanizacją, rosnąca populacja klasy średniej, lokalna dostępność i upowszechnienie przekąsek w małych opakowaniach, niska cena oraz strategia firmy dotycząca skoncentrowania się na regionalnym guście – wszystko to przyczynia się do rozwoju rynku technologii do noszenia” [12]. Z wymienionych powodów, e-tekstylna szybko staje się składnikami elektroniki użytkowej [15].

2.3. Internet produktów sektora tekstylnego

Internet produktów sektora tekstylnego jest segmentem, a więc częścią Internetu rzeczy i Internetu wszechrzeczy.

Internet rzeczy określanej też jako Internet przedmiotów (*Internet of Things* – IoT) to koncepcja oparta na nawiązywaniu łączności pomiędzy jednoznacznie identyfikowalnymi urządzeniami M2M (*machine to machine*), w celach gromadzenia, przetwarzania lub wymiany danych za pomocą sieci komputerowej lub instalacji elektrycznej. Urządzenia te, w zależności od ich liczby, mogą tworzyć sieć dowolnych rozmiarów.

Rozwój IoT rozpoczął czwartą rewolucję przemysłową i warunkuje wzrost Przemysłu 4.0, opartego na połączeniu systemów i inteligentnych maszyn, automatyzacji, wymianie danych oraz komunikacji z użytkownikami produktów i usług.

Przemysł tekstylny-odzieżowy wymaga wdrożenia identyfikowalności w celu rozwiązania problemów asymetrii informacji i małej ich transparentności. Klienci oczekują wyrobów dobrej jakości oraz przestrzegania ekologicznych i etycznych praktyk w procesach produkcyjnych, a także zapewnienia autentyczności produktu. Z tych powodów, prowadzi się badania dotyczące identyfikowalności produktów opisywanego sektora, w wielu ogniwach łańcucha dostaw tekstyliów i odzieży. Celem innowacyjnych, opartych na nowoczesnej technologii projektów łańcuchów dostaw jest budowanie zaufania wśród partnerów, upoważnienie do śledzenia dostaw, zapewnienie systemu identyfikowalności wyrobów, zwiększenie elastyczności oraz zapewnienie przejrzystych i zrównoważonych działań [16]. Problemy i ograniczenia w zastosowaniach rozwiązań IoT stanowią [17]:

- a) zasilanie,
- b) optymalna miniaturyzacja,
- c) infrastruktura techniczna,
- d) brak jednolitych standardów,
- e) bezpieczeństwo danych osobowych,
- f) udostępnianie danych,
- g) przekonanie ludzi o pełnym bezpieczeństwie zastosowania technologii.

Ponadto, oczekuje się, że w nadchodzących latach liczba urządzeń IoT wzrośnie do dziesiątek miliardów fizycznych obiektów, co spowoduje

duże obciążenie dla środowiska. Z tego powodu ocena cyklu życia tych wyrobów jest istotnym problemem i wyzwaniem dla producentów [18].

IoT jest przez niektórych używany zamiennie z pojęciem Internet wszechrzeczy [17].

Internet wszechrzeczy (*Internet of Everythings* – IoE) jest siecią, która przez Internet łączy ludzi, procesy, dane i przedmioty oraz tworzy nową wartość. Do powstania Internetu wszechrzeczy doprowadziły uzupełniające się czynniki takie jak: rozwój IoT, nowych technologii, *Big Data*, chmury obliczeniowej (*cloud computing*), systemów cyberfizycznych (*cyber-physical systems*), rozszerzonej rzeczywistości i postęp mobilnej rewolucji.

Przedsiębiorstwa, które opierają swoje innowacyjne modele biznesów na IoE mogą uzyskać wzrost sprzedaży produktów i usług dzięki automatyzacji procesów biznesowych, zwiększeniu efektywności operacyjnej, zwiększeniu oszczędności, skróceniu procesów, nowym sposobom interakcji, komunikacji i współpracy z interesariuszami oraz poprawie jakości obsługi klientów, a także – dzięki wzrostowi bezpieczeństwa procesów [19].

Internet produktów sektora tekstylnego (*Internet of Textile Things* – IoTT lub IoT2) to segment IoT oraz IoE – koncepcja oparta na e-tekstyliach funkcjonujących w zautomatyzowanych systemach RFID. Zadaniem systemu RFID są gromadzenie, przetwarzanie i wymiana danych, których jednym z nośników jest identyfikator RFID zintegrowany w trwały sposób, w strukturze tekstronicznej produktu sektora tekstylnego. Wyrób tekstroniczny – stanowiący obiekt oznaczony unikalnym, pasywnym identyfikatorem radiowym – określono w tym opracowaniu badawczym jako RFIDtex. IoTT obejmuje pełny okres cyklu życia

RFIDtex, a więc następujące jego etapy: produkcja, kontrola jakości, dystrybucja w łańcuchach dostaw, eksploatacja, reklamacja i utylizacja. W przyszłości przewidywane jest powszechne wykorzystanie RFIDtex w obszarze IoTT.

Systemy RFID z RFIDtex mają zastosowanie we wspieraniu IoTT. Są one przeznaczone do użytkowania przez cały cykl życia oznakowanego wyrobu włókienniczego, włącznie z recyklingiem e-tekstyliów. Zastosowanie systemów RFID w każdej nowej technologii (np. prania) poszerza możliwości efektywnego zarządzania cyklem życia produktu IoTT [20-23].

W 2014 roku powstała marka RAIN i RAIN Alliance – organizacja branżowa reprezentująca ponad 160 firm członkowskich, mających interesy w rozwijaniu i rozszerzaniu wykorzystania i wartości techniki RAIN RFID, zapewniającej wprowadzanie danych do IoT. Tylko w 2020 roku sprzedano ponad 21 miliardów pasywnych identyfikatorów RFID. W okresie 2015-2020 zidentyfikowano ponad 80 miliardów rzeczy z użyciem tej bezprzewodowej, prostej, dostępnej i niedrogiej techniki. Według prognozy firmy badawczej IDTechEx, następuje wzrost użycia identyfikatorów RAIN RFID. Przedstawiciele RAIN wskazali, że technika RAIN RFID może pomóc supermarketom zmniejszyć ilość odpadów w sklepach o 20%, a ponadto – poprawić wydajność i śledzić towary od gospodarstwa rolnego do magazynu [24].

RAIN definiują koncepcję IoT jako rozszerzenie sieci: czujników, infrastruktury RFID, telekomunikacyjnej, geograficznej (opartej na lokalizacji) itd. Przedstawiciele RAIN wskazali, że według około 64% producentów reprezentujących Przemysł 4.0, biznesowe zastosowanie IoT

zwiększy ich rentowność w okresie 2022-2026. Sukces ten może być między innymi wynikiem atutów systemu RAIN RFID takich jak [24]:

- a) działanie w czasie rzeczywistym,
- b) zbieranie danych z oznaczonych produktów,
- c) śledzenie lokalizacji, statusu, historii, relacji,
- d) analizowanie danych dotyczących aktywów,
- e) wysyłanie alertów na podstawie reguł użytkownika,
- f) uruchamianie raportów inwentaryzacyjnych,
- g) łatwość obsługi.

Inteligentne ubrania w IoTT „szukają równowagi między modą, inżynierią, interakcją, doświadczeniem użytkownika, cyberbezpieczeństwem, projektowaniem i nauką, aby na nowo odkrywać technologie, które mogą przewidywać potrzeby i pragnienia ludzi. Obecnie szybka konwergencja tekstyliów i elektroniki umożliwia bezproblemową i masową integrację czujników z tekstyliami oraz rozwój przędzy przewodzącej. Potencjał inteligentnych tkanin, które mogą komunikować się ze *smartfonami* w celu przetwarzania informacji biometrycznych, takich jak tętno, temperatura, oddychanie, stres, ruch, przyspieszenie, a nawet poziom hormonów, obiecuje nową erę dla handlu detalicznego” [25]. Zdaniem ekspertów, przemysł tekstylny-odzieżowy jest jednym z najbardziej konkurencyjnych sektorów światowego rynku. Koncepcje Przemysłu 4.0 wywierają nacisk na firmy tekstylne i odzieżowe, aby wytwarzały one e-tekstyli. Zwłaszcza w krajach rozwijających się, firmy odnotowują wysoki wskaźnik niepowodzeń 70-80% w takich wdrożeniach i z tego powodu wiele firm rezygnuje z opisywanych innowacji. Z tego powodu, postuluje się wdrażanie systemów *Business Intelligence* opartych na technologii-organizacji-

środowisku, aby przetwarzać duże zbiory danych i wykorzystać prawdziwą wartość inteligentnych technologii [26].

3. Potencjalne zastosowania inteligentnych tekstyliów w sektorze odzieżowym

3.1. Opis sekcji tematycznych przeglądu literatury

W tej części opracowania badawczego zawarto przegląd możliwych zastosowań inteligentnych tekstyliów – interesujący z punktu widzenia podstaw podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwach sektora odzieżowego, w kontekście możliwości i ograniczeń rozwoju tekstroniki. Przegląd literatury obejmuje 106 opracowań naukowych, w których zaprezentowano wyniki badań z lat 2020-2021. Przegląd ten podzielono na sekcje tematyczne takie jak:

- a) zaawansowana elektronika, zasilanie i pomiary (54 opracowania),
- b) medycyna, sport i bezpieczeństwo (26 opracowań),
- c) ogrzewanie ciała i inne funkcje termiczne (9 opracowań),
- d) *strong man*, sztuczne mięśnie (3 opracowania),
- e) moda (7 opracowań),
- f) zrównoważony rozwój i przewaga konkurencyjna (7 opracowań).

Wyróżnione kategorie są nieostre, co oznacza, że mogą być dowolnie mieszane lub stanowić podzbiory w różnych konfiguracjach, np. „c”, „d” jako elementy „b”; „e” jako przykład zastosowania „a” itp. Głównymi kryteriami wyróżnienia sześciu kategorii były: krótka nazwa i wywołanie u czytelnika szybkiego skojarzenia funkcjonalności, a więc aplikacji w

przemysle odzieżowym prezentowanych rozwiązań technicznych lub technologicznych.

3.2. Zaawansowana elektronika, zasilanie i pomiary

Współcześnie prowadzi się liczne prace mające na celu uzyskanie wzrostu niezawodności odzieży wykonanej z e-tekstyliów. Jedną z nich było badanie wytwarzania elektrowłókniny z wzorami cewek i kondensatorów na tkaninie dżinsowej, stanowiące podstawę do zaprojektowania e-tekstyliów do noszenia. Przedmiotem opisywanego badania był wpływ naprężeń zginających i umiarkowanych wahań temperatury na wydajność elektryczną struktur e-tekstyliów wykonanych z tkanin dżinsowych [27].

Odzież z e-tekstyliów o strukturze kompozytowej można zastosować w różnych wzorach obwodów i projektach szytych na miarę, zgodnie z określonym projektem. Uzyskuje się to poprzez haftowanie płytki drukowanej z użyciem cienkiej, elastycznej, polimerowej, metalicznej przędzy przewodzącej prąd elektryczny [28].

Tkaniny z auksetycznej, elastycznej, samoskładającej się przędzy aktualnie mają zastosowanie w produkcji inteligentnych materiałów okładzinowych, ale w przyszłości mogą znaleźć także inne zastosowania tam, gdzie istotne okażą się ich właściwości samozawijania i samozaginania w stanie naturalnym [29].

Dzięki zastosowaniu w szortach czterech czujników uzyskano inteligentną odzież umożliwiającą wieloosiowe śledzenie ruchu ciała użytkownika [30].

Przedmiot kolejnych badań stanowią cewki indukcyjne wykonane na bazie tekstyliów, służące do bezprzewodowej transmisji mocy. Współczesne badania dotyczą sprawności tej transmisji [31].

Odzież ze zintegrowanej przędzy posrebrzanej *Vectran* ma liczne potencjalne zastosowania ułatwiające życie. Aktualnie prowadzi się badania nad wpływem różnych czynników zewnętrznych, takich jak: odkształcenia, rozmiar pola lutowniczego, temperatura, ścieranie i mycie, na rezystancję elektryczną przędzy *Vectran* do montażu powierzchniowego [32].

Prowadzone są także badania dotyczące optymalizacji haftu stebnowego wykonywanego przędzą poliamidową posrebrzaną w celu wytwarzania ścieżek przewodzących w produkcji e-tekstyliów [33].

Włókna wykonane z przędzonych nanorurek węglowych stanowią alternatywę dla drukowanych komponentów elektronicznych, a zastosowanie tych materiałów przędzalniczych umożliwi wiele nowych funkcjonalności w obszarze e-tekstyliów [34].

Odzież wykonana z przędzy trybo elektrycznej, dająca możliwość przekształcania energii mechanicznej na energię elektryczną, spełnia wymogi przemysłu tekstylnego pod względem ścieralności i prania. W odróżnieniu od większości rozwiązań proponowanych aktualnie na rynku, odzież wykonana z unikalnej przędzy tryboelektrycznej zachowuje funkcjonalność po ponad 1200 cyklach tarcia i 10 cyklach prania. Daje możliwość wykrywania ruchu ciała i funkcję zbierania energii, dzięki przewodzącej elektrodzie z nanorurek węglowych pokrytej włóknami poli(fluorku winylidenu), które tworzą funkcjonalną, zmywalną powłokę polimerową [35].

Prowadzone są prace nad prostym, tanim i powtarzalnym procesem produkcji e-tekstyliów, które znajdą zastosowanie w wytwarzaniu inteligentnej odzieży. W bawełnianą tkaninę wprowadza się włókna nanokompozytowe węglowo-elastomerowe, które są wysoce przewodzące

i elastyczne – mogą wytrzymać naprężenia do 40%. Istnieje możliwość wykorzystania kompozytów jako czujników tensometrycznych do wykrywania zginania [36].

Odzież z elastycznej, elektrycznie przewodzącej powłoki termoplastycznego poliuretanu wytwarza się w procesie powlekania dostosowanego do przędz wielowłókiennych. Roztwór do powlekania zawiera termoplastyczny poliuretan, nanorurki węglowe i N-metylo-2-pirolidon [37].

Alternatywą dla włókna węglowego jest zastosowanie tkanin poliestrowych powlekanych polipirolem w celu uzyskania ekranowania elektrycznego i elektromagnetycznego. Prowadzi się badania mające na celu zwiększenie skuteczności ekranowania tkanin kompozytowych (poliestrowo-polipirolowych) poprzez pokrywanie w skali mikro i nano tkanin poliestrowych przewodzącymi powłokami polimerowymi [38].

Lutowanie elektroniki do inteligentnych tekstyliów, to jedna z użytecznych aktualnie metod integracji elektroniki z tkaniną [39].

Ważnym trendem w projektowaniu e-tekstyliów do noszenia jest miniaturyzacja. Przykładem jest jednowarstwowy tekstylny czujnik ciśnienia, który – w odróżnieniu od relatywnie dużego elektronicznego wielowarstwowego czujnika ciśnienia – został zbudowany ze splecionych elektrod i przewodzących włókien. Ma wymiary 14 x 14 mm, jest relatywnie elastyczny i cienki (0,4 mm), cały jego obszar jest wrażliwy na nacisk, ma szybką reakcję (50 ms) i wysoką trwałość przy wielu cyklach pracy (20 000 cykli) oraz prania (50 razy) [40].

Współczesne badania naukowe koncentrują się także nad poprawą przewodności połączeń elektroniki z tekstyliami. Uzyskane wyniki tych

badan wskazują na korzyści wynikające ze zgrzewania ultradźwiękowego w produkcji inteligentnych tekstyliów [41].

Kolejne badania dotyczą budowy nowej linii sygnałowej i użytych w niej materiałów mających zastosowanie w inteligentnej odzieży [42].

Inteligentne spodnie identyfikujące sygnały niewerbalne podczas interakcji społecznej są szyte na miarę i mają czujniki ciśnienia, które zostały zaprojektowane i wkomponowane strukturalnie w tkaninę. Umożliwiają one badanie ruchów dolnych partii ciała oraz rejestrację i ocenę zachowań podczas rozmowy prowadzonej na siedząco. Taka rejestracja i ocena zachowań dokonuje się z zastosowaniem prostych technik uczenia maszynowego [43].

Inteligentna odzież z bawełnianej tkaniny, z elastyczną baterią aktywowaną wodą ma liczne zastosowania, ponieważ wiele urządzeń wymaga zasilania. Bateria jest nanoszona na tkaninę w tanim procesie produkcyjnym sitodruku, dzięki któremu łatwo dochodzi do integracji obu warstw. Bateria stanowi solidne, lekkie i elastyczne źródło zasilania. Jej architektura jest prosta, oparta na standardowej reakcji redoks aluminium-srebro i mostku solnym. Bateria wymaga do aktywacji dodania wody, dlatego można ją sklasyfikować jako akumulator rezerwowy. Nadaje się do długotrwałego przechowywania i ma znikomy współczynnik samorozładowania. Prowadzi się prace nad wzrostem jej pojemności i optymalizacją konstrukcji [44].

Inteligentna odzież z funkcją samozasilania pozwala pozyskiwać energię z naprzemiennych ruchów ludzkiego ciała, pocierania o siebie powierzchni tekstyliów w wyniku na przykład chodzenia. W tkaninę wbudowuje się elektrody z przedz przewodzących i wykorzystuje się efekt indukcji elektrostatycznej. Maksymalne szczytowe napięcie 230 V i prąd

obciążenia sięgający 11,6 μA uzyskiwane są w wyniku pocierania odzieży. Energia elektryczna może być akumulowana w kondensatorze lub bezpośrednio zapalać 20 niebieskich diod LED. Ta inteligentna odzież jest wytrzymała i odporna na pranie [45].

Do produkcji inteligentnej odzieży często używa się przewodzące posrebrzane nici poliamidowe. Prowadzi się badania dotyczące wpływu prania na ich własności takie jak: niezawodność, wytrzymałość, przewodność i tym samym – gotowość do wprowadzenia na rynek. W tym celu prowadzi się testy nici szytych ścięciem jednoliniowym na tkaninie bawełnianej i haftowanych ścięciem trzyczędowym. Do symulacji procesu prania używa się testera ścierania Martindale w warunkach mokrych i suchych, z użyciem wody, wody ze standardowym detergentem i wody z detergentem dostępnym w handlu. Wpływ ścierania na posrebrzane nici poliamidowe bada się pod mikroskopem optycznym. Uzyskano między innymi wnioski dotyczące lepszych elektrycznych wartości przewodności haftu niż ścięgu jednoliniowego [46].

Inteligentna odzież z tkanym czujnikiem piezoelektrycznym może być stosowana do pomiaru parametrów takich jak siła drgań, ciśnienie i prędkość [47].

Inteligentna odzież tkana z piezoelektrycznych włókien Nylon-11 ma zastosowania w produkcji odzieży sportowej i do monitoringu zdrowia. Może być także wykorzystana do przenośnego wytwarzania energii [48].

Możliwe jest optymalizowanie procesu produkcji wysoce przewodzących wstęg z nanowłókien Nylon-6. We wnioskach z prezentowanych wyników badań podkreślono, że obiecujące jest ich zastosowanie w tekstylnych liniach transmisji sygnału, w inteligentnych ubraniach [49].

Inteligentna odzież z tkanym piezoelektrycznym czujnikiem ciśnienia może być wykonana z mieszanki wiskozowych włókien przewodzących (włókien celulozowych zawierających sadzę) z włóknami poliestrowymi, które pozwalają uzyskać włókninę o właściwościach piezoelektrycznych, wykorzystywaną jako czujnik ciśnienia (w niskim zakresie ciśnień 400–1000 Pa). Opisane rozwiązanie technologiczne spełnia wymagania stawiane inteligentnym ubraniom, to znaczy – e- tkanina pełni funkcje techniczne, jest nietoksyczna, łatwa w użyciu i nadaje się do recyklingu [50].

Odzież powlekana ochronnymi powłokami polimerowymi zawierającymi krzemiany warstwowe, zabezpiecza przewodzące struktury e- tkaniny, drukowane metodą sitodruku, przed utlenianiem i korozją, przy jednoczesnym zachowaniu ich właściwości takich jak: elastyczność, bardzo wysoka odporność na ścieranie (niezmienna po 85000 cyklach ścierania), przepuszczalność pary wodnej ($<2,5$ g/m² wartość jest zależna od grubości materiału – d) niższa niż w przypadku powłok powszechnie stosowanych w sektorze tekstylnym [51].

Odzież wykonana z cienkiej, optycznie przezroczystej złocisto-srebrnej siatki nanodrutowej naniesionej na powierzchnię włókien polimerowych charakteryzuje przewodność elektryczna. Ponadto, pojedyncze włókna można rozciągnąć do 15% bez utraty przewodności, a siatkę włókninową – analogicznie – do około 25% [52].

Przedmiot badań stanowią także właściwości mechaniczne i elektryczne elastycznych polimerów [53].

Inteligentna odzież wykonana z metamateriałów (metapowierzchni) badana jest jako struktura podlegająca odkształceniom takim jak: zginanie, rozciąganie i walcowanie. Odkształcenia te powodują, że położenie

elementów metamaterialnych zmienia się względem siebie. Pomimo tych zmian, dąży się do pozyskania dokładnych informacji o lokalizacji meta materiałów i do optymalizacji ich kontrolowania, np. wysokiej rozdzielczości monitoringu strukturalnego i wykrywania w trudnych warunkach [54].

Odzież z dzianinowym czujnikiem odkształcenia, wykorzystującym dwa rodzaje przędzy przewodzącej – jak włókna węglowe i przędzę powlekaną aluminium, ma zastosowanie do pomiaru ruchu, z uwagi na możliwość badania przez czujniki tensometryczne sił ściskających, rozciągających, naprężeń itp. W porównaniu do konwencjonalnych czujników tekstylnych, wykorzystujących jeden rodzaj przędzy przewodzącej, nowy dzianinowy czujnik naprężeń zbudowany z włókien węglowych, przędz powlekanych aluminium i przędz normalnych, ma ponad 10 razy wyższą czułość. Nowy czujnik tekstylny może być używany jako czujnik ruchu, na przykład poprzez przyłożenie go do części łączącej ubrania. Koszt jego produkcji na dużą skalę jest niski [55].

Ubrania lniane i bawełniane z tekstylnym metalo-organicznym, wysoce selektywnym czujnikiem wilgotności uzyskuje się poprzez osadzenie na powierzchni tkaniny cienkiej aktywnej folii i utworzenie naprzemiennych elektrod tekstylnych. Opisywany czujnik wykazał wysoki poziom selektywności w zakresie wykrywania pary wodnej, dodatkowo także w obecności kilku lotnych związków organicznych, dzięki czemu może mieć zastosowanie do wykrywania toksycznych gazów i par [56].

Inteligentna odzież z ekranami dotykowymi powinna działać niezawodnie w różnych warunkach temperatury i wilgotności powietrza. Prowadzi się badania nad rozszerzeniem zakresu temperatury powietrza

oraz wilgotności względnej i bezwzględnej, w których ekrany dotykowe będą działały niezawodnie, z uwagi na oporność elektryczną skóry [57].

Bada się wpływ cyklicznego zginania i tarcia na charakterystykę impedancji tekstylnych linii sygnałowych e-tekstyliów [58].

Kolejną koncepcją badań jest wytworzenie meta materiałów e-tekstylnych, a więc nadającej się do noszenia elektrowłókniny [59].

Prowadzi się badania mające na celu wzrost wydajności haftowanych cewek tekstylnych działających w przestrzeni, na ciele i przez ciało. Wyniki pomiarów w przestrzeni wykazują około 90% zgodność między wynikami analitycznymi i eksperymentalnymi [60].

Badania e-tekstyliów do produkcji inteligentnych ubrań dotyczą wielowarstwowych dzianin z termoplastycznego poliuretanu z różnymi projektami drukowanych płytek z rozciągliwych torów meandrowych na bazie miedzi. Wyzwaniem dla badaczy jest takie skonstruowanie e-tkaniny, by była rozciągliwa i odporna na naprężenia mechaniczne w pralce, a więc by niezawodnie przewodziła prąd elektryczny pomimo wielu cykli prania [61].

Przedmiotem licznych badań jest przewodność elektryczna elektroprzędzonych tekstyliów do produkcji innowacyjnych inteligentnych ubrań o licznych, zaawansowanych funkcjonalnościach. Badania te dotyczą nowych przędz z membran elektroprzędzonych i przędz elektroprzędzonych na bazie polianiliny/poliwinylopirolidonu [62].

Kolejny obszar aktualnie prowadzonych badań stanowi przepuszczająca powietrze i elastyczna dwustronna włóknina do produkcji odzieży z regulowanymi parametrami optycznymi w podczerwieni [63].

Odzież samozasilająca, pozyskująca energię biomechaniczną wymaga zastosowania zaawansowanej techniki dziania nanogeneratorów

tryboelektrycznych. Zaletami takich dzianin są: znaczna rozciągliwość, doskonała elastyczność, dopasowanie do ciała i komfort użytkownika. Badania w tym zakresie opierają się na przeglądzie klasyfikacji, cech strukturalnych, cech energii ruchu człowieka, mechanizmów pracy, zastosowań praktycznych, wyzwań produkcji przemysłowej i przyszłych perspektyw tryboelektryki dzianin tekstylnych [64].

Kolejnym obszarem badań w zakresie e-tekstyliów do produkcji inteligentnych ubrań są tanie i lekkie superkondensatory w kształcie włókien, o wysokiej energii, gęstości mocy, a więc znacznej szybkości transferu energii na jednostkę objętości. Autorów badań zainspirowała tkankowa struktura naturalnego bambusa, w którym komórki miąższu przechowujące składniki odżywcze są oplatanie wokół włókien bambusa [65].

Inteligentna odzież z elektroniką drukowaną (*Printed Electronics*) techniką fleksografii *roll-to-roll* znajduje się na razie we wstępnej fazie badań, które – jak dotąd – nie dają w pełni oczekiwanych wyników. Technika fleksografii *roll-to-roll* umożliwia ciągłą produkcję i wysoką wydajność, a jednocześnie niskie koszty. Optymalizacji podlegają parametry procesu, właściwości farby i podłoża. Istotne są zwłaszcza penetracja atramentu, jednolitość druku, przyczepność, trwałość i przewodność elektryczna srebra w atramencie drukowanym na elastycznych podłożach, takich jak tkanina i włóknina. Wyniki badania przeprowadzonego z użyciem optycznego, skaningowego mikroskopu elektronowego wykazały, że w odniesieniu do zachowania przewodnictwa, podłoża porowate (tekstylium i włókniny) bez obróbki wstępnej i końcowej nie dają akceptowalnych wyników pod względem przewodności elektrycznej. Nadrukowane na nich kolory wydają się jednak dość odporne

na pranie. Zdaniem badaczy – „rozwiązaniem dla optymalnego nadruku na tekstyliach byłaby wstępna obróbka podłoża poprzez zastosowanie różnych związków środków chemicznych zwiększających przyczepność tuszu do tkaniny” [66].

Bawełniana tkanina z wyświetlaczem elektrotermochromowym na bazie grafenu to kolejny obszar badań stanowiący wyzwanie technologii e-tekstyliów i potencjalne zastosowanie w inteligentnej odzieży. Powłoki elektrotermochromowe przewodzą napięcie i przybierają różne kolory pod wpływem zmiany temperatury otoczenia [67].

Kolejne badania dotyczyły podwójnie spolaryzowanych czteroportowych anten tekstylnych mających zastosowanie do bezprzewodowego zasilania i przesyłania informacji. Wyzwaniem dla badaczy anten, używanych w inteligentnej odzieży, jest ciało ludzkie, które stanowi nieprzewidywalne środowisko komunikacji [68].

RFIDtex czyli odzież z wyhaftowanymi identyfikatorami RFID, komunikującymi się ze sprzętem AGD (pralką i żelazkiem) umożliwia automatyczny, optymalny wybór ustawień sprzętu, np. programu prania i temperatury prasowania. Wybór ten jest warunkowany informacjami zawartymi w identyfikatorze RFID, dotyczącymi rodzaju tkaniny i jest możliwy dzięki działaniu systemu zarządzania RFID *Read/Write Device*. Aktualnie prowadzi się prace badawcze nad projektem i optymalizacją działania stanowiska laboratoryjnego do demonstracji systemu RFID z RFIDtex, na przykładzie pralki. Badanie umożliwiło symulację obecności RFIDtex w bębnie pralki oraz pomiary sprawności odczytu danych z tych identyfikatorów tekstronicznych RFID przez urządzenie umieszczone w pralce. Prowadzone badania otwierają nowe możliwości automatycznego sterowania procesem prania, np.: ustawienie optymalnego

programu jednoczesnego prania wielu różnych tkanin, kontrolowanie prędkości obrotowej bębna pralki oraz zmian temperatury wody podczas prania, monitorowanie zużycia wody i prądu, a także kontroli dozowania i zużycia detergentu [20-21].

Opracowanie i wdrożenie w przedsiębiorstwie systemu RFID wykorzystującego RFIDtex wymaga realizacji wielu etapów i podejmowania licznych decyzji, takich jak:

- a) analiza wymagań – ocena praktycznych problemów wdrożeniowych [69],
- b) projektowanie architektury systemu RFID, modelowanie – utworzenie matematycznego modelu systemu RFID umożliwiającego zautomatyzowanie wybranego procesu identyfikacji RFIDtex [70-71],
- c) projektowanie, programowanie, integracja – wyznaczenie wymaganych parametrów systemu i urządzeń RFID do ich niezawodnej pracy [72-73],
- d) testowanie – wykonanie demonstratorów urządzeń i doświadczalne zweryfikowanie na nich działania projektowanego systemu RFID [74-77],
- e) prototypowanie i wdrożenie – skonstruowanie prototypów urządzeń RFID przeznaczonych do wdrożenia w przedsiębiorstwie i uczestnictwo w fazie ich komercjalizacji,
- f) ocena uwarunkowań decyzyjnych: analiza potencjału rynkowego, badanie możliwości komercjalizacji nowego systemu RFID [78] wykorzystującego RFIDtex.

Inteligentna odzież zasilająca się sama to cel współczesnych badań obejmujących projektowanie, wykonanie i optymalizację pracy

tekstronicznej anteny RFID do układu pozyskiwania energii z pola elektromagnetycznego (np. systemów radiokomunikacyjnych powszechnego użytku), jej przetwarzania, gromadzenia i wykorzystywania dla zapewnienia realizacji dodatkowych funkcji systemu RFID. Zastosowanie opisanych mechanizmów w konstrukcji tekstylnego identyfikatora RFID wymaga zastąpienia baterii innym źródłem dodatkowego zasilania, jakim jest np. superkondensator. Jest to pasywny akumulator energii elektrycznej będący urządzeniem bezbaterijnym (ang. *batteryless devices*), który można wkomponować w strukturę RFIDtex.

3.3. Medycyna, sport i bezpieczeństwo

Dopasowany kombinezon z e-tekstyliów służy do wyczuwania *in vivo* multimodalnych czynności fizjologicznych ludzkiego organizmu, takich jak: temperatura, tętno i oddychanie. Kombinezon jest podobny do koszuli kompresyjnej – miękki, rozciągliwy, przepuszczający powietrze, umożliwiając bliski kontakt między elektroniką a skórą, zapewniający komfort fizyczny i możliwy do wyprania. Z dużą dokładnością mierzy temperaturę skóry, tętno i oddech poprzez mechaniczno-akustyczną detekcję bezwładności. E-tekstylna dziania rozciąga się do 30% w 1000 cykli rozciągania, bez pogorszenia własności mechanicznych i elektrycznych. Wyniki badań wskazują, że kombinezon może jednocześnie, bezprzewodowo monitorować temperaturę skóry w 30 punktach na całym ciele człowieka, na powierzchni 1500 cm², podczas oddychania i aktywności fizycznej, poprzez dynamikę bezwładności [79].

Inteligentna odzież, zawierająca elektroniczne elektrody tekstylne wykonane z posrebrzanych włókien nylonowych, ma zastosowanie jako narzędzie diagnostyczne w monitorowaniu aktywności

elektrofizjologicznej oraz w identyfikacji zmian właściwości skóry, takich jak temperatura i pocenie. Według aktualnych szacunków, postępy w sektorach tekstylnym i telekomunikacyjnym spowodują, że taka odzież będzie nieodłącznym elementem telemedycyny [80].

Inteligentna odzież może zostać wyposażona w trzy tekstylne elektrody EKG wplecione w tkaninę. Pozyskane sygnały elektrokardiogramu przesyłane są do smartfona – przez *Bluetooth* lub do komputera – za pomocą *smartfona* przez *WiFi* lub Internet. Dokonywany w czasie rzeczywistym pomiar sygnałów elektrokardiogramu poprzez inteligentną odzież pozwala stale monitorować stan zdrowia ludzi, podczas ich aktywności oraz w stanie spoczynku, np. w trakcie snu [81].

Inteligentna koszula ze zintegrowanymi czujnikami tekstylnymi umożliwia ilościowe monitorowanie zużycia tlenu w warunkach pozalaboratoryjnych, w połączeniu z badaniem wydolności oddechowej, tętna i intensywności ćwiczeń człowieka. Dzięki klasyfikacji aktywności fizycznej, system z dużą dokładnością rozróżniał aktywność energiczną, umiarkowaną i lekką oraz monitorował przestrzeganie zaleceń dotyczących ćwiczeń, w zależności od sprawności użytkownika koszuli [82].

Ubranie wykrywające ciecze, z elastycznym tekstylnym akumulatorem aluminiowo-powietrznym ma następujące cechy: zawiera źródło energii, nie zawiera szkodliwych dla organizmu substancji, może być przechowywane w stanie czuwania i w stanie suchym przez nieokreślony czas, jest elastyczne oraz ma właściwości dotykowe podobne do tekstyliów. Badania eksperymentalne dotyczyły na razie prototypu elastycznego wieloogniowego akumulatora zbudowanego głównie z aluminiowej anody, katody powietrznej i bawełnianej powłoki. Główną

cechą opisywanego źródła energii było oddzielenie elektrolitu i elektrody. Elektrolit był podawany tylko wtedy, gdy bateria wymagała aktywacji. Akumulator był więc wykorzystywany jako aktywny czujnik generujący prąd elektryczny jedynie w sytuacji, gdy wykrył ciecz. Potencjalnym zastosowaniem odzieży z takim źródłem zasilania może być zainteresowany sektor opieki medycznej [83].

Opaska na głowę, do śledzenia ruchu gałek ocznych oraz zdalnego sterowania obiektami za pomocą wzroku, zawiera miękkie elektrody tekstylne z grafenu i może być zastosowana w elektrookulografii do tworzenia aplikacji rozpoznających aktywność i świadomość kontekstu, a także w interakcjach człowiek-maszyna i w osobistych urządzeniach medycznych. Tekstylia grafenowe są tworzone w oparciu o tanią i dostępną technologię, która w przyszłości może zastąpić drogie oraz nieporęczne systemy śledzenia wzroku, oparte na kamerach. Aktualnie trwają prace nad wzrostem niezawodności opisaney techniki badań elektrofizjologicznych narządu wzroku [84].

Inteligentna odzież do monitorowania częstości oddechów i akcji serca może być wykonana z syntetycznej tkaniny, na którą, techniką sitodruku, nakłada się odpowiednio rozproszony w wodzie przezroczysty tusz. W ten sposób powstaje nowy czujnik odkształcenia (naprężeń) wykonany z nanopłytek grafenowych. Inteligentne ubrania oparte na czujnikach naprężeń zintegrowanych z tkaniną mogą mieć zastosowania do pomiaru w czasie rzeczywistym fizjologicznych parametrów ciała oraz do monitorowania bezpieczeństwa i higieny pracy. Barrierami rozwoju badań opisywanych e-tekstyliów są ekspozycja na warunki środowiskowe i negatywne skutki prania [85].

Inteligentna odzież monitorująca temperaturę skóry może znaleźć zastosowanie w sektorach medycznym i sportowym. Obecnie, do pomiarów temperatury ciała, wykorzystuje się rezystory termiczne (termistory) montowane na skórze i raczej niewygodne dla użytkownika, a także obrazowanie termiczne – trudne do wdrożenia i analizy. Alternatywą dla obu tych metod jest zastosowanie inteligentnej odzieży wykonanej z przędz elektronicznych wykrywających temperaturę skóry użytkownika. Chociaż wymagane są dalsze badania, już ustalono, że w niektórych przypadkach, nagromadzenie potu znacząco zmieniło temperaturę skóry rejestrowaną przez przędzę elektroniczną [86].

Odzież wełniana, powlekana ochronnymi powłokami zawierającymi nanokompozyty polianiliny z nanodiamentem, zwiększa szansę podołania najtrudniejszym wyzwaniom stawianym e-tekstyliom, takim jak: funkcjonalność, stabilność, komfort użytkowania, a także odporność na pranie i przecieranie. Dzięki zastosowaniu powłok nanokompozytowych, opisywane e-tkaniny odznaczają się relatywnie zwiększoną trwałością i doskonałymi właściwościami mechanicznymi, przepuszczają powietrze oraz zapewniają komfort użytkowania. Wskazane zalety e-tkanin sprawiają, że nadają się one do produkcji wielofunkcyjnej inteligentnej odzieży sportowej, umożliwiającej monitorowanie funkcji życiowych i innych aktywności organizmu [87].

Odzież do terapii hipertermii piersi konstrukcyjnie opiera się na tekstylnej antenie konformalnej, która nieznacznie podnosi temperaturę piersi przez promieniowanie elektromagnetyczne, aby dezaktywować i uszkodzić komórki rakowe. Jest to metoda polegająca na nieinwazyjnym, długotrwałym leczeniu nowotworów piersi [88].

Odzież z włókien kompozytowych do zastosowań fotokatalitycznych jest wrażliwa na promieniowanie UV, promieniowanie widzialne lub podczerwień. Reakcja fotokatalityczna daje więc efekt neutralizacji (filtru) wymienionych rodzajów promieniowania i ochrony przed skutkami jego niekorzystnego oddziaływania na skórę ludzką [89].

Odzież z tkaniny bawełnianej, identyfikująca pH jest możliwa do uzyskania dzięki fotoprzeszczepieniu molekuly halochromowej na powierzchni tej tkaniny. Barwnik żółcień nitrazynowa został zmodyfikowany ugrupowaniem metakrylowym i tak uzyskano barwnik fotoreaktywny. Wykazano, że barwnik ten umożliwił ocenę kwasowości lub zasadowości (pH) tkaniny [90].

Odzież z dzianiny przeciwdrobnoustrojowej zapewnia działanie antybakteryjne, nietoksyczność, odporność na pranie, trwałość podczas użytkowania i przepuszczalność powietrza. Są to właściwości, które zwiększają bezpieczeństwo i komfort użytkowników ubrań. Dzianiny o różnym składzie surowcowym zostały poddane obróbce antybakteryjnej nowym komercyjnym produktem przeciwdrobnoustrojowym *Si Bactericidal*. Z wyjątkami niektórych dzianin bawełnianych, zabieg przyniósł pozytywne rezultaty – działanie przeciwbakteryjnie okazało się skuteczne i długotrwałe [91].

Inteligentny bandaż może być wyposażony w zintegrowany tekstylny czujnik wilgoci, oparty na przewodzącym polimerze poly(3,4-ethylenedioxythiophene):polystyrene sulfonate. Tekstylny czujnik wilgoci może być dodatkowo zintegrowany z identyfikatorem RFID, realizującym bezprzewodowy monitoring w czasie rzeczywistym i pozwolić badać zmiany impedancji – od stanów suchych do mokrych. Inteligentny bandaż ma zastosowanie w leczeniu trudno gojących się ran.

Niewielki wysięk z rany może wysuszyć ranę, a duży wysięk – doprowadzić do jej maceracji. Monitorowanie trudno gojącej się rany wymaga zdejmowania opatrunku. Tymczasem zastosowanie inteligentnego bandaża pozwala utrzymać wymagany poziom nawilżenia rany, przy jednoczesnym ograniczeniu niepotrzebnej zmiany opatrunku, co optymalizuje proces gojenia [92].

Opaska bawełniana ze strukturalnie wkomponowaną baterią, aktywowaną przez ludzki pot, może być umieszczona na głowie i znaleźć liczne zastosowania, na przykład w zasilaniu reflektorów diodowych, wykrywaniu ruchu i oddechu człowieka oraz monitorowaniu pacjentów. Baterie aktywowane przez pot to lekkie, skalowalne i zmywalne biokompatybilne generatory energii, które wytwarzają wystarczającą moc dla urządzeń elektronicznych z interfejsem skórny. Taka się je na bazie przędzy bawełnianej w strukturze segmentowej. Segmenty tkaniny są modyfikowane sadzą i owinięte folią – w ten sposób są przygotowane do pełnienia funkcji katody, mostka solnego i anody. Baterię aktywuje wilgoć [93].

Inteligentny nakolannik do terapii TENS ze zintegrowanymi elektrodami tekstylnymi ma zastosowanie w fizjoterapii, która polega na prowadzeniu przez skórę elektrycznej stymulacji nerwów [94].

Inteligentna bezszwowa rękawica z systemem czujników ma zastosowanie podczas kontroli protezy ręki i wykrywania ruchów palców, zarówno u ludzi, jak u robotów. Wskazano pożądane elementy konstrukcyjne rękawicy takie jak: „przewodność elektryczna, komfort, dopasowanie kształtu, czułość elektryczna i konfigurowalny projekt” [95].

Inteligentny rękaw haptyczny ma zastosowanie w rehabilitacji, teleoperacji oraz jako pomoc szkoleniowa. Stanowi on interfejs dotykowy

oparty na tkaninach i pomaga użytkownikowi zachować oraz rozwinać zdolności motoryczne, lepiej niż poprzez wzrokowe uzyskanie informacji zwrotnej. Rękaw haptyczny przyspiesza proces uczenia się [96].

Odzież wykorzystująca inteligentną technologię tekstylną powstała z zastosowaniem podejścia opartego na uczeniu się ze wzmocnieniem. Integrując czujniki dotykowe z fragmentem tkaniny, uzyskuje się i doskonali zdolności proprioceptywne, określane też jako czucie głębokie, a więc odczuwanie pozycji, lokalizacji, orientacji i ruchu ciała, a także jego części [97].

Inteligentne urządzenie tekstylne na palce strzelca pozwala monitorować ruch. Opracowany system monitorowania naciągu spustu dostarcza sygnały, które można wykorzystać do rozpoznania nieprawidłowych ruchów spustu podczas oddawania strzałów z pistoletu [98].

Inteligentna odzież lub jej elementy (np. kieszenie, ochraniacze, pokrowce) mogą pełnić funkcję ekranowania pola elektrostatycznego (elektrycznego) i elektromagnetycznego. Tkaniny będące ekranami elektrostatycznymi stanowią osłonę chroniącą przed wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Natomiast tkaniny będące ekranami elektromagnetycznymi osłaniają przed wpływem zewnętrznego pola elektromagnetycznego, a zwłaszcza pól o dużych częstotliwościach. Służą do tego tkaniny lub filce wykonane z włókna węglowego, które zamieniają energię pola elektromagnetycznego na energię elektryczną, a następnie – cieplną. Odzież ochronna wykonana z tkanin pełniących funkcję ekranowania elektromagnetycznego ma właściwości pasywne, a więc nie wymaga zapewnienia źródła zasilania, jest prosta i wygodna w użyciu oraz znajduje liczne zastosowania takie jak: tekstylia do ekranowania urządzeń

(np. telefonów komórkowych, nawigatorów, *pagerów*, wielkogabarytowych urządzeń radarowych, czytników), w przypadku których konieczne jest zmniejszenie lub blokowanie pola elektromagnetycznego w określonym zakresie. Jest to stosowane w zawodach specjalistycznych, sporcie i medycynie, na przykład dla użytkowników z rozrusznikami serca. Inne, niemedycezne powody izolowania i blokowania pola elektromagnetycznego (np. dostępu do urządzeń mobilnych) to zaspokojenie na wysokim poziomie potrzeb bezpieczeństwa, wypoczynku i relaksacji użytkownika [99].

Inteligentna odzież ochronna z tkaniny *Janus grafen/Kevlar* ma zastosowanie w zabezpieczaniu ludzkiego ciała przed fizycznymi obrażeniami, poprzez zintegrowanie nowoczesnej elektroniki z tradycyjnym kombinezonem ochronnym i wyposażenie go we wszechstronne, inteligentne funkcje. W tym obszarze rozwoju e-tekstyliów prowadzi się prace badawcze, mające na celu zachowanie elastyczności tkanin i przepuszczalności przez nie powietrza [100].

Inteligentny kask z czujnikami i inteligentne buty, z czujnikami umieszczonymi we wkładkach, służą do klasyfikacji wzorców przenoszenia ciężaru w głowie i w stopach podczas schodzenia ze schodów. Mogą być pomocne w wykrywaniu upadków pracowników na placach budowy [101].

Inteligentne buty robocze do monitorowania aktywności i bezpieczeństwa na placu budowy zawierają czujnik nacisku zamontowany we wkładce tekstylnej. Czujnik został zaprojektowany w oparciu o zasady równoległego pomiaru pojemności z wykorzystaniem przewodzącej tkaniny. Opisane inteligentne buty stanowią element

systemu monitorowania do zarządzania bezpieczeństwem pracowników sektora budowlanego w czasie rzeczywistym [102].

Inteligentna odzież z materiałów tekstylnych o właściwościach magnetycznych i higienicznych ma potencjalne zastosowania dla sportowców i osób niepełnosprawnych. Materiały włókiennicze wypełnione są nanocząstkami magnetytu. Prowadzone badania mikroskopowe, dotyczą przyczepności cząstek magnetycznych do włókien materiału tekstylnego, ich odporności, liczby cykli ścierania i zastosowań tych materiałów [103].

Odzież z aktywnej tkaniny wykorzystującej zasady higrosterowania ma zdolność zwiększania przepuszczalności powietrza w warunkach wilgotnych oraz zmniejszania przepuszczalności w warunkach suchych, w zakresie od 25% do 30%. Właściwość prototypu nowatorskiej tkaniny jest odwrotna w porównaniu z konwencjonalnymi tkaninami z bawełny, wełny i sztucznego jedwabiu, których przepuszczalność powietrza zmniejsza się wraz ze wzrostem ich wilgotności. Inna prototypowa tkanina może zmienić kształt pod wpływem wody, ponieważ wykonana jest z higroskopijnego włókna, które w wilgotnych warunkach może skrócić się do 40% [104].

3.4. Ogrzewanie ciała i inne funkcje termiczne

Superwytrzymała i rozciągliwa odzież, zapewniająca ogrzewanie elektrotermiczne, może być wyprodukowana z zastosowaniem technologii opartej na międzycząsteczkowej samoorganizacji sprzężonej z dopaminą karboksymetylocelulozy, z nanorurkami węglowymi. Po ich koagulacji w nierozpuszczalniku, zawiesiny łatwo tworzą kompozytowe włókna wykazujące superwytrzymałość strukturalną, rozciągliwość i wysoką przewodność elektryczną. E-tekstyli stanowiące sieci przewodzące utworzone z opisywanych włókien można zginać, odkształcać i ścisnąć

w powietrzu oraz płynach. Elektroaktywne i przydatne w kontakcie z człowiekiem ubrania, wykonane z takich e-tekstyliów, znajdują zastosowania jako elektryczne urządzenia grzejne [105].

Jedwabie termochromowe do sterowania temperaturą mają zastosowanie w inteligentnych tekstyliach, urządzeniach do noszenia, elastycznych wyświetlaczach i interfejsach człowiek-maszyna. Zaletami jedwabiu są między innymi: trwałość, połysk oraz przepuszczalność powietrza i wilgoci. Prowadzi się badania nad udoskonaleniem procesu produkcji tkanin jedwabnych przez zintegrowanie techniki przędzenia i ciągłego powlekania włókien oraz przez ich zanurzenie w celu uzyskania coraz lepszych właściwości mechanicznych, jak: wytrzymałość, udarność i wiązanie międzyfazowe [106].

Odzież z inteligentnych tkanin przewodzących energię cieplną i elektryczną uzyskano poprzez impregnowanie włókien bawełny i lycry® stosami nanomateriałów grafitowych i zawiesinami acetonu. W wyniku opisanego procesu, te najczęściej używane tkaniny – naturalna i sztuczna – uzyskały dodatkowe właściwości [107].

Przedmiotami kolejnych badań były inteligentne tkaniny *Smart Thermally Actuating Textiles*, które uruchamiane są termicznie [108].

Odzież z tkaniny termoadaptacyjnej zapewnia użytkownikowi komfort termiczny, bez zużycia energii. Struktura tkaniny termoadaptacyjnej stanowi układ porów (podobnych do porów skóry człowieka) w kształcie kłapek, które otwierają się, dzięki zastosowanym siłownikom, pod wpływem wilgoci (np. potu). Opisywana struktura jest dwuwarstwowa – składa się z warstwy higroskopijnej wykonanej z glikolu

polietylenowego i octanu celulozy oraz polimeru hydrofobowego typu poliestrowego. Prezentowana tkanina termoadaptacyjna wykazała natychmiastową wydajność chłodzenia zainicjowaną poceniem się ciała. Noszenie ubrań z tej tkaniny może ułatwić oszczędzanie energii niezbędnej do ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji budynków [109].

Odzież inteligentna termicznie może być wykonana z nylonowej folii termoregulacyjnej o strukturze warstwowej: srebrno – dwutlenek wanadu – srebro (kanapka $\text{Ag}/\text{VO}_2/\text{Ag}$). Udowodniono eksperymentalnie, że opisana struktura sieci z nanodrutów wbudowana w e-tekstylię wykazała termoczulą przewodność elektryczną, wyjątkową stabilność w warunkach zginania i korzystne wyniki badań w zakresie wydajności ekranowania promieniowania elektromagnetycznego. Podkreślono, że opisany materiał ma ogromny potencjał zastosowań w produkcji inteligentnej odzieży, elastycznej elektroniki, monitorów medycznych, a także urządzeń inteligentnego sterowania promieniowaniem elektromagnetycznym [110].

Inteligentna bielizna o właściwościach nawilżających i odprowadzających wilgoć zapewnia komfort zwłaszcza w gorącym i wilgotnym środowisku. Została opracowana na bazie grafenu przez firmę Janus [111].

Odzież z bawełny organicznej, z anteną tekstylną do pomiaru temperatury została skonstruowana z wykorzystaniem prostej anteny mikropaskowej i charakterystyki dielektrycznej materiałów nieprzewodzących. Antena tekstylna wykrywa temperaturę z dokładnością do 1 stopnia Celsjusza przy milimetrowych częstotliwościach fal [112].

Odzież ochronna odporna na czynniki termiczne, takie jak: płomień, promieniowanie cieplne i roztopione metale – może być

zaprojektowana z inteligentnego materiału tekstylnego ze stopami z pamięcią kształtu [113].

3.5. Strong man, sztuczne mięśnie

Odzież ze sztucznymi mięśniami skonstruowana została z siłowników przędzy, które były skręconymi i zwijanymi nanorurkami węglowymi, napędzanymi elektrochemicznie lub elektrotermicznie. Nowatorskie hybrydowe przędzie tekstylne łączyły siłowniki przędzy i elektroaktywną polipirolową powłokę. Dzięki tej hybrydowej konstrukcji, przędzie uzyskały znaczną wytrzymałość na rozciąganie, doskonałą odporność na ścieranie w środowisku mokrym i suchym oraz dobre właściwości uruchamiania. Z uwagi na wymienione zalety, opisywane przędzie mogą znaleźć zastosowanie jako miękkie siłowniki w egzoszkielecie tekstylnych i w urządzeniach do przenoszenia rzeczy [114].

Odzież wykonana z włókien wiskozowych symulujących sztuczne mięśnie wrażliwe na wodę, pod wpływem pocenia się ciała, kurczy się nawet do 35% i pozwala uzyskać siłę wielokrotnie większą niż siła mięśni szkieletowych organizmów o tej samej masie. Sztuczny mięsień ma kształt spirali i został skonstruowany z włókien wiskozowych bez modyfikacji chemicznej. Tkanina wykonana z włókien wiskozy może wchłonać znaczną ilość wody, w wyniku czego pęcznieje anizotropowo, a więc rozszerza się głównie w kierunku promieniowym [115].

Egzoszkielec z e-tekstyliów to pancerz wspomagany, który ma zastosowanie we wzmacnianiu siły mięśni użytkownika i jest prekursorem sztucznych mięśni w inteligentnych urządzeniach wykonanych na bazie tkanin. Do jego produkcji można zastosować szybko działającą i wytrzymałą przędę napędzaną przez elektrochemicznie siłowniki, w

konfiguracjach skręconych i zwijanych. Jest to przędza przewodząca elektrochemicznie powlekana polimerem. Aktualnie pracuje się nad metodami produkcji siłowników z przędzy powlekanej wielowłókienkowej o strukturze skręconej i zwijanej, zapewniającej ponad 1% działania liniowego w czasie krótszym niż 1 s przy napięciu 0,6 V [116].

3.6. Moda

Odzież z miękkich i rozciągliwych tkanin *Ultrasheer*, emitujących światło ze zmiennymi wzorami wyświetlania, to nowe podejście do projektowania ubrań i mody. Emitowanie światła przez opisywane e-tekstylika, o niespotykanej dotąd wydajności rozciągania, jest możliwe dzięki zastosowaniu półprzezroczystej elektrody przewodzącej na bazie ultraprzejrzystej tkaniny oraz dzięki osadzaniu konformalnej złotej powłoki na powierzchni włókien tekstylnych, przy użyciu bezprądowego osadzania w roztworze [117].

Ubrania z tekstylnymi diodami elektroluminescencyjnymi i możliwością wielokierunkowego marszczenia mają zastosowanie w sektorach modowym i biomedycznym oraz służą do zapewniania bezpieczeństwa użytkowników. Opisywana odzież stanowi platformę tekstylną, a więc elastyczny wyświetlacz tekstylny z ultracienką warstwą planaryzacyjną odwzorowaną z płaskiej powierzchni szkła. Jest to wyświetlacz zbudowany z organicznych czerwonych, zielonych i niebieskich diod elektroluminescencyjnych, cienkowarstwowych tranzystorów wytwarzanych w niskiej temperaturze oraz zmywalnej warstwy enkapsulacji (hermetyzacji, ochrony) blokującej gaz i ciecz. Tak skonstruowana platforma tekstylna jest odporna na namarszczenie i naprężenia mechaniczne, dzięki czemu może wytrzymać ruchy ludzkiego ciała wykonywane podczas użytkowania ubrania. Opisaną platformę

tekstylną można nakładać na każdy rodzaj tkaniny. Jest ona odporna na deszcz, pot i mycie [118].

Odzież z organicznymi diodami elektroluminescencyjnymi została wykonana jako silnie nieprzepuszczalna, elastyczna, wodoodporna, usieciowana, hydrofobowa folia polimerowa. Organiczne diody użyte w tej strukturze e-tekstylnej cechuje stabilna żywotność, wytrzymałość mechaniczna na deformację pod wpływem ruchu użytkownika odzieży, zachowanie właściwości optoelektronicznych w wodnym otoczeniu i zmywalność podczas prania, w deszczu i pod wpływem potu [119].

Inteligentna odzież zawierająca taśmę z diodami elektroluminescencyjnymi o rozciągliwości powyżej 20% może być wytwarzana z e-tekstyliów będących połączeniem diod elektroluminescencyjnych z długimi, pionowymi, falistymi i rozciągliwymi strukturami elektrod z folii miedzianej. W produkcji tych e-tekstyliów zastosowano ciągły proces mikropofałdowania dla uzyskania długich jednolitych połączeń pionowych. Ten proces wytwórczy pozwolił uzyskać elastyczność świecącego i kolorowego inteligentnego ubrania [120].

Odzież zmieniająca kolor z elastycznych, rozciągliwych tkanin przepuszczających wilgoć i ciepło może być wyprodukowana na bazie hierarchicznych struktur porowatych wykonanych z niekonwencjonalnych rozciągliwych włókien przewodzących, stanowiących warstwę rdzeniową, a także – z powłoki termochromowej. Uzyskano w ten sposób włókna przewodzące o długości do kilku metrów, które odznaczają się niezawodnym przewodnictwem elektrycznym i wydajnością elektrotermiczną. Rozciągliwe włókna elektrotermochromowe występują w dwóch trybach zmiany koloru. Autorzy opisaney koncepcji

zapropowali zastosowanie tej inteligentnej odzieży jako wojskowy inteligentny kamuflaż adaptacyjny [121].

Tekstylia adaptacyjne wykonane z kompozytów zmieniających kształt w reakcji na światło, temperaturę lub wilgotność to istotny współcześnie trend produkcyjny [122].

Odzież z kompozytów polimerowo-tekstylnych drukowanych w 3D to koncepcja bezpośredniego wytłaczania materiału wykonanego z polimerów na tkaniny tekstylne w celu połączenia materiałów i uzyskania nowej tkaniny. Potencjał tej koncepcji tkwi w funkcjonalności nowo uzyskanych tkanin oraz w eksploracji wielomateriałowych kompozytów, a także w innowacyjnej estetyce techniki druku [123].

3.7. Zrównoważony rozwój i przewaga konkurencyjna

Na podstawie wywiadów przeprowadzonych z dwunastoma menedżerami z różnych rumuńskich marek modowych, wyciągnięto wnioski, że producenci odzieży modowej zaczęli wdrażać zaawansowane technologie w swoich nowych kolekcjach, aby rozwijać działalność, wyróżnić się na tle konkurencji, zaoferować wartość dodaną, a ponadto, by wdrożyć kreatywne rozwiązania. W większości, nowoczesna odzież z e-tekstyliów to na razie produkty niszowe [124].

Według projektantów i producentów, inteligentna odzież powinna zaspokajać spersonalizowane potrzeby konsumentów w zakresie pracy, rozrywki, mody i opieki zdrowotnej. Aktualnie podkreśla się w tym kontekście znaczenie zrównoważonego rozwoju oraz wskazuje się na wyzwania związane z dostawami surowców, projektowaniem, produkcją, magazynowaniem, logistyką i recyklingiem inteligentnej odzieży [125].

Analiza przeprowadzona w latach 2013-2018 pozwoliła zaobserwować przejście do gospodarki o obiegu zamkniętym, na przykładzie Inditexu – firmy z sektora mody [126].

W firmach produkujących tekstylia i odzież, przyjęcie technologii Przemysłu 4.0 z zaawansowanymi rozwiązaniami *Business Intelligence* stanowiło podstawę osiągnięcia zrównoważonego rozwoju i przewagi konkurencyjnej [127].

Wnioski z badań 350 małych i średnich przedsiębiorstw tekstylnych w Pakistanie, wskazały na istotne powiązanie między innowacjami a wydajnością przedsiębiorstw, z moderującym wpływem otoczenia [128].

Wyniki badań 503 producentów tekstyliów i odzieży w Pakistanie pokazały, że istniał silny pozytywny związek pomiędzy transferem technologii i technologicznymi zdolnościami przedsiębiorstw [129].

Można wskazać czynniki kluczowe dla inwestorów w obszarze techniki RFID w polskich przedsiębiorstwach – były to: usprawnienia różnych procesów, koszt wdrożenia systemu RFID, jakość i cena identyfikatora RFID oraz czas zwrotu z inwestycji. Dla menedżerów priorytetowe były więc kryteria decyzyjne związane z wartością systemu RFID – jego zastosowaniami, atrakcyjnością, jakością, kosztem działania i zyskami. W dalszej kolejności wskazali oni kryteria decyzyjne takie jak wiedza i ryzyko związane z inwestycją [130].

4. Podstawy i kierunki podejmowania decyzji menedżerskich – wnioski z badań

Większość prezentowanych w literaturze obszarów zastosowań rozwiązań IoT trudno skojarzyć z sektorami tekstylnym i odzieżowym [por.: 17]. W 2023 roku, a więc w dwudziestym trzecim roku rozwoju

tekstroniki, w czasie wzrostu jej trzeciej generacji – ultrainteligentnych tekstyliów i ubrań, po przestudiowaniu tego opracowania badawczego, można nabrać pewności, że wszystkie obszary zastosowań rozwiązań IoT oraz IoE mogą mieć związek z sektorami tekstylnym i odzieżowym. Związek ten jest technicznie możliwy do uzyskania, a przed przystąpieniem do projektowania i produkcji odzieży, należałoby go jedynie uzasadnić chęcią zaspokojenia potrzeby użytkownika ubrania. Według szacunków, w okresie 2022-2028 globalny rynek *wearables* – a więc akcesoriów i ubrań z ultrainteligentnych tekstyliów – wzrośnie o ponad 45%. Jeśli nie nastąpią istotne zakłócenia geopolityczne i ta prognoza w kolejnych latach będzie stawała się faktem, wówczas sieci tworzące IoT, IoE, IoTT będą się rozwijały, wyzwalając potencjał dla tworzenia nowych modeli biznesu.

Możliwe zastosowania rozwiązań IoT, IoE, w tym IoTT, stanowią inspirację do podejmowania decyzji menedżerskich w zakresach przedmiotu i kierunków kształtowania modeli biznesu przedsiębiorstw sektora odzieżowego. Do zastosowań tych należą [opracowanie własne na podstawie: 17]:

- a) inteligentne monitorowanie środowiska – np. identyfikacja przez ubranie temperatury, wilgotności, promieniowania UV, toksycznych gazów i par w otoczeniu, a także pola elektrostatycznego i elektromagnetycznego,
- b) inteligentna energia – np. pozyskiwanie przez odzież energii z pola elektromagnetycznego, monitoring procesów wytwarzania i wykorzystania energii, oszczędzanie energii niezbędnej do ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji budynków

- przez inteligentną odzież dostosowującą temperaturę ogrzewania ciała do otoczenia,
- c) inteligentne systemy pomiarowe – np. zautomatyzowanie procesów pomiaru wielkości fizycznych, przesyłania i interpretowania danych, bieżący monitoring, wczesne ostrzeżenie,
 - d) inteligentne zdrowie – np. monitoring stanu zdrowia i aktywności fizycznej ludzi, monitoring pacjentów w szpitalu i w domu (telemedycyna), ostrzeżenie o odchyleniach parametrów od normy, kontrola snu, terapia, fizjoterapia,
 - e) inteligentny przemysł – np. monitoring procesów i zapewnienie przestrzegania etycznych praktyk zrównoważonej gospodarki we wszystkich ogniwach przemysłu od pozyskiwania surowców, półfabrykatów, półproduktów, podzespołów (np. bawełny, elektroniki itp.), poprzez wytwarzanie produktów (tekstyliów, e-tekstyliów, *wearables*), dostarczanie towarów (inteligentnej odzieży) i ich reklamację aż do recyklingu i utylizacji odpadów,
 - f) inteligentna produkcja – np. kontrola pracowników, linii produkcyjnych, wytwarzania produktów, rotacji produktów, stanu magazynów, recyklingu odpadów, a także szkolenia (rękaw haptyczny, egzoskielet, inteligentne rękawice), przenoszenie ciężarów (sztuczne mięśnie), BHP,
 - g) inteligentny transport – np. monitoring procesów logistycznych zapewniający: budowanie zaufania wśród partnerów, upoważnienie do śledzenia dostaw, zapewnienie systemu

- identyfikowalności i autentyczności wyrobów, wzrost elastyczności oraz przejrzystych i zrównoważonych działań,
- h) inteligentna gospodarka wodna – np. kontrola zużycia wody w procesie prania inteligentnej odzieży w pralce, przez system zarządzania RFID z RFIDtex,
 - i) inteligentne miasto – np. bezobsługowe (autonomiczne) sklepy odzieżowe czynne całą dobę,
 - j) inteligentny budynek i jego otoczenie – np. system wykrywania przez inteligentny budynek ruchu użytkownika inteligentnej odzieży,
 - k) inteligentne mieszkanie – np. odzież z wszytymi identyfikatorami RFID (RFIDtex), komunikującymi się ze sprzętem AGD (pralką i żelazkiem) w celu automatycznego ustawienia optymalnego programu (prania, prasowania),
 - l) inteligentne życie – np. wygodne i bezpieczne funkcjonowanie poprzez odzież odpowiednią do warunków zewnętrznych (zabezpieczenie przeciwsłoneczne), ochrona dóbr osobistych (ekranowanie pola elektromagnetycznego), zabezpieczenie ciała podczas wykonywania zawodów specjalistycznych lub niebezpiecznych czynności (ekranowanie pola elektromagnetycznego, wykrywanie toksycznych par i gazów, wzmocnienie siły mięśni podczas prac fizycznych, zabezpieczanie przed obrażeniami fizycznymi lub termicznymi).

Inteligentne ubrania powinny być estetycznie wykonane, ale także zapewniać komfort fizyczny podczas użytkowania, a więc spełniać wymogi takie jak:

- a) nietoksyczność,

- b) przepuszczanie powietrza,
- c) właściwości dotykowe podobne do tekstyliów,
- d) elastyczność, rozciągliwość, możliwość dopasowania do sylwetki,
- e) wytrzymałość mechaniczna na deformację pod wpływem ruchu (zginanie, odkształcanie, ściskanie, walcowanie),
- f) odporność na tarcie i ścieranie w środowisku suchym i mokrym (pot, wilgoć, deszcz, mycie, pranie),
- g) dobre właściwości uruchamiania i niezawodność działania w różnych warunkach (np. termicznych) oraz trwałość użytkowania.

Oprócz zapewnienia wymienionych podstawowych cech inteligentnych ubrań, ważny jest wybór wartości dodanych wynikających z ich funkcjonalności. Wartości te stanowią:

- a) pomiar funkcji życiowych organizmu: tętna, częstości oddechów (wydolności oddechowej), zużycia tlenu, temperatury skóry, odczynu pH skóry, sygnałów elektrokardiogramu, ciśnienia, poziomu hormonów, pocenia, stresu, ruchu, prędkości, przyspieszenia, intensywności aktywności fizycznej (np. ćwiczeń),
- b) śledzenie ruchu gałek ocznych,
- c) reagowanie na dotyk,
- d) ogrzewanie ciała dostosowane do temperatury otoczenia,
- e) chłodzenie zainicjowane poceniem się ciała,
- f) pomiar temperatury, wilgoci i siły drgań w otoczeniu,
- g) wzmacnianie siły mięśni szkieletowych,

- h) pozyskiwanie energii z pola elektromagnetycznego (samozasilanie),
- i) ekranowanie pola elektrostatycznego (elektrycznego) lub pola elektromagnetycznego,
- j) zabezpieczanie ludzkiego ciała przed fizycznymi obrażeniami,
- k) wykrywanie upadków,
- l) wykrywanie pary wodnej oraz toksycznych gazów i par,
- m) ochrona przed ogniem, promieniowaniem cieplnym i roztopionymi metalami,
- n) pełnienie funkcji leczniczych, terapeutycznych i fizjoterapeutycznych (hipertermia piersi, elektrookulografia, elektryczna stymulacja nerwów TENS, egzoskielet tekstylny, rękaw haptyczny),
- o) wrażliwość na promieniowanie UV, promieniowanie widzialne lub podczerwień, a także regulacja parametrów optycznych w podczerwieni,
- p) oświetlenie użytkownika lub jego otoczenia, rozjaśnianie i zmiana koloru, emisja światła ze zmiennymi wzorami wyświetlania, wojskowy inteligentny kamuflaż adaptacyjny,
- q) działanie antybakteryjne, przeciwdrobnoustrojowe,
- r) zapewnienie właściwości magnetycznych lub higronastycznych,
- s) łączenie wielomateriałowych kompozytów i tworzenie nowych tkanin (druk 3D).

W zależności od pożądaných parametrów i przeznaczenia projektowanej inteligentnej odzieży, należy wybrać materiał, z którego zostanie ona wykonana. Menedżerowie i ich zespoły mają do wyboru liczne nici, przędze, włókna i inne surowce (np. metale, powłoki, zawiesziny

i barwniki, produkty służące do modyfikowania tkanin jak np. sadza), z których mogą wyprodukować naturalne i/lub syntetyczne tkaniny, dzianiny, włókniny, filce, folie, tkaniny kompozytowe i metamateriały. E-tekstylię wytwarza się z materiałów takich jak:

- a) bawełna (może być modyfikowana sadzą),
- b) wełna,
- c) len,
- d) jedwab,
- e) lycra®,
- f) poliester,
- g) poliamid,
- h) Nylon-6 i Nylon-11,
- i) wiskoza (włókno celulozowe, które można modyfikować sadzą),
- j) włókno węglowe,
- k) grafen,
- l) tkanina *Janus grafen/Kevlar*,
- m) tkanina *Ultrasheer*,
- n) folia nylonowa,
- o) folia polimerowa,
- p) folia miedziana.

Niektóre wymienione materiały można pokryć powłokami, które zapewniają inteligentnym ubraniom określone funkcjonalności – głównie przewodność elektryczną, ale także elastyczność i inne właściwości, szczegółowo opisane w poprzedniej części tego opracowania badawczego.

W produkcji e-tekstyliów można stosować powłoki takie jak:

- a) srebrna,

- b) złota,
- c) aluminiowa,
- d) poliuretanowa,
- e) polimerowa (przykłady powłok stosowanych w tkaninach wielowarstwowych czyli kompozytowych stanowią: polipirolova i polianilinowa z nanodiamentem),
- f) z zawiesin acetonu,
- g) z substancji *Si Bactericidal*,
- h) elektrochromowa (elektroreaktywna) z metali i tlenków metali [131],
- i) termochromowa (termoreaktywna) z farb lub lakierów [131],
- j) fotochromowa (fotoreaktywna) z metali i tlenków metali [131].

Oprócz powlekania materiałów, stosuje się ich zanurzenie i nasączenie (np. nanocząsteczkami magnetytu).

Istotny obszar decyzji menedżerskich stanowi technologia, jaką zastosuje się w produkcji struktury tekstronicznej odzieży. Zakres technologii, metod i technik jest duży oraz poszerza się wraz postępowaniem naukowym. Dla produkcji e-tekstyliów i inteligentnych ubrań dostępne są następujące narzędzia:

- a) szycie ścięciem jednoliniowym,
- b) haftowanie,
- c) klejenie,
- d) prasowanie,
- e) dzianie,
- f) przędzenie,
- g) lutowanie,
- h) zgrzewanie ultradźwiękowe,

- i) naprężanie elektrochemiczne lub elektrotermiczne,
- j) drukowanie metodą sitodruku,
- k) drukowanie techniką fleksografii *roll-to-roll*,
- l) drukowanie w 3D,
- m) powlekanie, nasączenie lub zanurzanie włókien,
- n) łączenie warstw kompozytów (np. polimerowo-tekstylnych).

Według kryterium rankingu popularności tematów prac naukowych opublikowanych na *Web of Science* w okresie 2020-2021, potencjalne inspiracje dotyczące zastosowania inteligentnych tekstyliów i inteligentnych ubrań stanowią:

- a) zaawansowana elektronika, zasilanie i pomiary,
- b) medycyna, sport i bezpieczeństwo,
- c) ogrzewanie ciała i inne funkcje termiczne,
- d) zrównoważony rozwój i przewaga konkurencyjna,
- e) moda,
- f) *strong man*, sztuczne mięśnie.

Inspiracje te można ze sobą dowolnie konfigurować, a także szukać nowych. Istotną motywacją menedżerów podczas podejmowania decyzji, powinna być chęć zaspokojenia istotnych potrzeb użytkowników ubrań, a więc klientów, np. estetyki wykonania, wygody użytkowania, dopasowania do sylwetki, pełnienia zdefiniowanych funkcji.

Wyzwania dla decydentów z przedsiębiorstw wytwarzających urządzenia działające w IoT, IoE oraz IoTT stanowią:

- a) wykorzystanie prawdziwej wartości inteligentnych technologii i zaspokajanie rzeczywistych potrzeb klientów, wynikających np. z ocieplania się klimatu na Ziemi,

- b) rozsądne projektowanie cykli życia wyrobów i zapewnienie efektywnej ochrony środowiska naturalnego przed dziesiątkami miliardów fizycznych obiektów – urządzeń, które po zakończeniu tych cykli należy poddać recyklingowi. Zbudowanie w przedsiębiorstwie i w jego otoczeniu poczucia odpowiedzialności,
- c) efektywne zasilanie,
- d) optymalna miniaturyzacja,
- e) zbudowanie infrastruktury technicznej,
- f) ujednoczenie standardów,
- g) zabezpieczenie danych osobowych,
- h) etyczne udostępnianie danych,
- i) przekonanie odbiorców i klientów o bezpieczeństwie zastosowania oraz użytkowania danej techniki.

Dla przykładu, wyzwania i zarazem atuty systemu RFID z RFIDtex, funkcjonującego w ramach IoTT, powinny stanowić:

- a) niezawodne działanie w czasie rzeczywistym oraz widoczne dla użytkownika korzyści takie jak np. skrócenie i automatyzacja procesów,
- b) zbieranie danych z RFIDtex,
- c) śledzenie lokalizacji, statusu, historii, relacji (automatyzacja procesów biznesowych),
- d) analizowanie danych dotyczących aktywów (zwiększenie efektywności operacyjnej),
- e) wysyłanie alertów na podstawie reguł użytkownika,
- f) uruchamianie raportów inwentaryzacyjnych,
- g) łatwość obsługi,

- h) nowy sposób interakcji, komunikacji i współpracy z interesariuszami oraz oferowania jakości klientom,
- i) transparentność i bezpieczeństwo procesów (etyka biznesu),
- j) oszczędności właściciela systemu, gdy minie czas zwrotu z inwestycji.

Doświadczenia rumuńskich marek modowych wskazują, że odzież z e-tekstyliów to na razie w większości produkty niszowe. Pewne jest, że nie wszystkie firmy odzieżowe, podejmujące tekstroniczne wyzwanie, zdołają uzyskać przewagę konkurencyjną. Zwłaszcza w krajach rozwijających się, firmy odnotowały wysoki wskaźnik niepowodzeń 70-80% we wdrożeniach produktów wykonanych z e-tekstyliów. Jednak, według około 64% producentów reprezentujących Przemysł 4.0, biznesowe zastosowanie IoT zwiększy rentowność produktów w okresie 2022-2026. Zdaniem ekspertów, przemysł tekstylny-odzieżowy jest jednym z najbardziej konkurencyjnych sektorów na światowym rynku. Są to obiecujące prognozy dla badanego sektora gospodarki światowej. Sukces przedsiębiorstwom odzieżowym mogą zapewnić interdyscyplinarne zaangażowane zespoły specjalistów, kierowane przez multi-dziedzinowych menedżerów.

Celem przeprowadzonych badań było zidentyfikowanie przedmiotu i kierunków podejmowania decyzji menedżerskich w przedsiębiorstwie sektora odzieżowego, zgodnych z koncepcjami *smart textiles*, *electronic textiles*, *Internet of Textile Things*, z uwzględnieniem możliwości i barier w rozwoju tekstroniki, w oparciu o analizę stanu wiedzy do kwietnia 2022 roku. Ten cel skoncentrowano na rozpoznaniu uwarunkowań występujących w otoczeniu technologicznym przedsiębiorstwa oraz częściowo, w jego otoczeniu sektorowym i został on osiągnięty.

Otoczenie technologiczne to zaledwie jeden z elementów makrootoczenia przedsiębiorstwa, dlatego należy rozważyć także pozostałe obszary otoczenia: społeczny, demograficzny, ekonomiczny, polityczny, prawny, międzynarodowy i przyrodniczy. Ponadto, uwarunkowania otoczenia branżowego wymagają poszerzonej eksploracji, więc niezbędne jest kontynuowanie badań.

Literatura

1. Quarshie A. M., Salmi A., Leuschner R.: Sustainability and Corporate Social Responsibility in Supply Chains: The State of Research in Supply Chain Management and Business Ethics Journals. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 22 (2), 82–97, <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2015.11.001>, 2016.
2. Jaegler, Y., Jaegler A., Burlat P., Lamouri S., Trentesaux D.: The ConWip Production Control System: A Systematic Review and Classification. *International Journal of Production Research*, 1–22, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1380325>, 2017.
3. Denyer D., Tranfield D.: Producing a Systematic Review, In *The SAGE Handbook of Organizational Research Methods*, edited by D. A. Buchanan and A. Bryman, 671–689, London, Sage, 2009.
4. Kim J., McMillan S.J.: Evaluation of internet advertising research: a bibliometric analysis of citations from key sources. *Journal of Advertising Research*, 37, 99–112, <https://doi.org/10.2753/JOA0091-3367370108>, 2008.
5. Bellis N. De: *Bibliometrics and Citation Analysis*, The Scarecrow Press, Lanham, 2009.
6. Fetscherin M., Usunier J.: Corporate branding: an interdisciplinary literature review. *European Journal of Marketing*, 46, 733–753, <https://doi.org/10.1108/03090561211212494>, 2012.
7. Fetscherin M., Heinrich D.: Consumer brand relationships research: a bibliometric citation meta-analysis. *Journal of Business Research*, 68, 380–390, <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2014.06.010>, 2015.
8. Çelikel D.C.: Smart E-Textile Materials, in: *Advanced Functional Materials*, edited by N. Tasaltin, P.S. Nnamchi and S. Saud, IntechOpe, <https://doi.org/10.5772/intechopen.87879>, 2020.
9. Zięba J., Frydrysiak M.: Textronics – Electrical and Electronic Textiles, Sensors for Breathing Frequency Measuremen. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, January / Decembe, 14, 5 (59), 43–48, 2006.
10. Tian Z., Zhang H., Xiu F., Zhang M., Zou J., Ban C., Nie Y., Jiang W., Hu B., Liu J.: Wearable and washable light/thermal emitting textiles. *Nanoscale Advances*, 3(9), 2475–2480, <https://doi.org/10.1039/d1na00063b>, 2021.

11. Mokhtari F., Spinks G. M. Fay, C. Cheng Z., Raad R., Xi J., Foroughi J.: Wearable Electronic Textiles from Nanostructured Piezoelectric Fibers. *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1900900, <https://doi.org/10.1002/admt.201900900>, 2020.
12. <https://www.openpr.com/news/2599738/wearable-technology-market-exhibit-a-cagr-of-45-4-2022-2028>, dostęp: 11.04.2022.
13. Wearable Technology Market – 2020, <https://www.marketsandmarkets.com>, dostęp: 11.04.2022.
14. Guo T., Wan Z., Li D., Song J., Rojas O. J., Jin Y.: Intermolecular self-assembly of dopamine-conjugated carboxymethylcellulose and carbon nanotubes toward supertough filaments and multifunctional wearables, *Chemical Engineering Journal*, 416, 128981, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128981>, 2021.
15. Ji X., Liu W., Yin Y., Wang C., Torrisi F.: A graphene-based electro-thermochromic textile display. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(44), 15788–15794, <https://doi.org/10.1039/d0tc03144e>, 2020.
16. Agrawal T. K., Kumar V., Pal R., Wang L., Chen Y.: Blockchain-based framework for supply chain traceability: A case example of textile and clothing industry. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107130, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107130>, 2021.
17. Kiełtyka L., Zygoń O.: Współczesne formy komunikacji – jak zarządzać z wykorzystaniem Internetu rzeczy i wszechrzeczy. *Przegląd Organizacji*, Nr 2 (937), 24–33, <https://doi.org/10.33141/po.2018.02.04>, 2018.
18. Pirson T., Bol D.: Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 322, 128966, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128966m>, 2021.
19. Cisco IoT Solutions, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/overview.html>, dostęp: 29.03.2022.
20. Pawłowicz B., Kołcz M., Jankowski-Miśkiewicz P.: The Idea of RFIDtex Transponders Utilization in Household Appliances on the Example of a Washing Machine Demonstrator, *Energies*, 15, 2639, <https://doi.org/10.3390/en15072639>, 2022.
21. Pawłowicz B., Kołcz S., Jankowski-Miśkiewicz P., Kołcz M.: The use of Textronics to Support the Work of Modern Washing Devices. *Selected Issues of Electrical*

- Engineering and Electronics (WZEE), 1–4, <https://doi.org/10.1109/WZEE54157.2021.9576996>, 2021.
22. Denuwara N., Maijala J., Hakovirta M.: Sustainability Benefits of RFID Technology in the Apparel Industry. *Sustainability*, 11, 6477, <https://doi.org/10.3390/su11226477>, 2019.
 23. Kim, Y.-W., Chang T.-W., Park J.: Gen RFID-Based System Framework for Resource Circulation in Closed-Loop Supply Chains. *Sustainability*, 9, 1995, <https://doi.org/10.3390/su9111995>, 2017.
 24. What is RAIN RFID? Detailed information about the technology, markets using RAIN RFID, and the Alliance, RAIN RFID E-BOOK, Summer 2021.
 25. Fernández-Caramés T. M., Fraga-Lamas P.: Towards The Internet of Smart Clothing: A Review on IoTWearables and Garments for Creating Intelligent Connected E-Textiles. *Electronics*, 7, 405, <https://doi.org/10.3390/electronics7120405>, 2018.
 26. Ahmad S., Miskon S., Alabdan R., Tlili I.: Statistical Assessment of Business Intelligence System Adoption Model for Sustainable Textile and Apparel Industry. *IEEE Access*, 9, 106560–106574, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100410>, 2021.
 27. Escobedo P., de Pablos-Florido J., Carvajal M. A., Martinez-Olmos A., Capitán-Vallvey L. F., Palma A. J.: The effect of bending on laser-cut electro-textile inductors and capacitors attached on denim as wearable structures. *Textile Research Journal*, 90(21–22), 2355–2366, <https://doi.org/10.1177/0040517520920570>, 2021.
 28. Ismar E., Tao X., Rault F., Dassonville F., Cochrane C.: Towards Embroidered Circuit Board From Conductive Yarns for E-Textiles. *IEEE Access*, 8, 155329–155336, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018759>, 2020.
 29. Liu S., Pan X., Zheng D., Liu G., Du Z.: The manufacture and characterization of auxetic, self-curling, and self-folding woven fabrics by helical auxetic yarns. *Journal of Industrial Textiles*, 50(1), 3–12, <https://doi.org/10.1177/1528083718817559>, 2020.
 30. Tavassolian M., Cuthbert T. J., Napier C., Peng J., Menon C.: Textile-Based Inductive Soft Strain Sensors for Fast Frequency Movement and Their Application in Wearable Devices Measuring Multiaxial Hip Joint Angles during Running.

- Advanced Intelligent Systems, 2(4), 1900165, <https://doi.org/10.1002/aisy.201900165>, 2020.
31. Micus S., Padani L., Haupt M., Gresser G. T.: Textile-Based Coils for Inductive Wireless Power Transmission. *Applied Sciences-Basel*, 11(9), 4309, <https://doi.org/10.3390/app11094309>, 2021.
 32. Simegnaw A. A., Malengier B., Tadesse M. G., Rotich G., Van Langenhove L.: Study the Electrical Properties of Surface Mount Device Integrated Silver Coated Vectran Yarn. *Materials*, 15(1), 272, <https://doi.org/10.3390/ma15010272>, 2022.
 33. Zheng Y., Jin L., Qi J., Liu Z., Xu L., Hayes S., Gill S., Li Y.: Performance evaluation of conductive tracks in fabricating e-textiles by lock-stitch embroidery. *Journal of Industrial Textiles*, July 13, 1528083720937289, <https://doi.org/10.1177/1528083720937289>, 2020.
 34. Taborowska P., Gizewski T., Patmore J., Janczak D., Jakubowska M., Lekawa-Raus A.: Spun Carbon Nanotube Fibres and Films as an Alternative to Printed Electronic Components. *Materials*, 13(2), 431, <https://doi.org/10.3390/ma13020431>, 2020.
 35. Busolo T., Szewczyk P. K., Nair M., Stachewicz U., Kar-Narayan S.: Triboelectric Yarns with Electrospun Functional Polymer Coatings for Highly Durable and Washable Smart Textile Applications. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 13(14), 16876–16886, <https://doi.org/10.1021/acsami.1c00983>, 2021.
 36. Podsiadly B., Walter P., Kaminski M., Skalski A., Sloma M.: Electrically Conductive Nanocomposite Fibers for Flexible and Structural Electronics. *Applied Sciences-Basel*, 12(3), 941, <https://doi.org/10.3390/app12030941>, 2022.
 37. Grellmann H., Bruns M., Lohse F. M., Kruppke I., Nocke A., Cherif C.: Development of an Elastic, Electrically Conductive Coating for TPU Filaments. *Materials*, 14(23), 7158, <https://doi.org/10.3390/ma14237158>, 2021.
 38. Cetiner S., Kose H.: A Systematic Study on Morphological, Electrical and Electromagnetic Shielding Performance of Polypyrrole Coated Polyester Fabrics. *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 31(2), 111–121, <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.843992>, <https://www.inkarbo.com/catalog/primenenie-uglevolokna/ekranirovanie-elektromagnitnogo-izlucheniya>, 2021.

39. Micus S., Haupt M., Gresser G. T.: Soldering Electronics to Smart Textiles by Pulsed Nd:YAG Laser. *Materials*, 13(11), 2429, <https://doi.org/10.3390/ma13112429>, 2020.
40. Kim G., Vu C. C., Kim J.: Single-Layer Pressure Textile Sensors with Woven Conductive Yarn Circuit. *Applied Sciences-Basel*, 10(8), 2877, <https://doi.org/10.3390/app10082877>, 2020.
41. Micus S., Rostami S. G., Haupt M., Gresser G. T., Meghrazi M. A., Eskandarian L.: Integrating Electronics to Textiles by Ultrasonic Welding for Cable-Driven Applications for Smart Textiles. *Materials*, 14(19), 5735, <https://doi.org/10.3390/ma14195735>, 2021.
42. Kubiak P., Leśnikowski J.: Influence of Mechanical Deformations on the Characteristic Impedance of Sewed Textile Signal Lines. *Materials*, 15(3), 1149, <https://doi.org/10.3390/ma15031149>, 2022.
43. Skach S., Healey P. G. T., Stewart R.: Sensing Social Behavior With Smart Trousers. *IEEE Pervasive Computing*, 20(3), 30–40, <https://doi.org/10.1109/MPRV.2021.3088153>, 2021.
44. Li Y., Yong S., Hillier N., Arumugam S., Beeby S.: Screen Printed Flexible Water Activated Battery on Woven Cotton Textile as a Power Supply for E-Textile Applications. *IEEE Access*, 8, 206958–206965, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038157>, 2020.
45. Li Z., Zhong J., Zi Y.: Robust Power Textile Based on Triboelectrification for Self-Powered Smart Textiles. *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, 1, 95–99, <https://doi.org/10.1109/OJNANO.2020.3024751>, 2020.
46. Atakan R., Tufan H. A., Zaman S. U., Cochrane C., Bahadir S. K., Koncar V., Kalaoglu F.: Protocol to assess the quality of transmission lines within smart textile structures. *Measurement*, 152, 107194, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107194>, 2020.
47. Park C., Kim H., Cha Y.: Piezoelectric Sensor with a Helical Structure on the Thread Core. *Applied Sciences-Basel*, 10(15), 5073, <https://doi.org/10.3390/app10155073>, 2020.
48. Anwar S., Hassanpour Amiri M., Jiang S., Abolhasani M. M., Rocha P. R. F., Asadi K.: Piezoelectric Nylon-11 Fibers for Electronic Textiles, Energy Harvesting and

- Sensing. *Advanced Functional Materials*, 31(4), 2004326, <https://doi.org/10.1002/adfm.202004326>, 2021.
49. Shin S., Lee E., Cho G.: Nylon 6 Nanofiber Web-Based Signal Transmission Line Treated with PEDOT:PSS and DMSO Treatment. *Materials*, 14(3), 498, <https://doi.org/10.3390/ma14030498>, 2021.
 50. Ullrich J., Eisenreich M., Zimmermann Y., Mayer D., Koehne N., Tschannett J. F., Mahmud-Ali A., Bechtold T.: Piezo-Sensitive Fabrics from Carbon Black Containing Conductive Cellulose Fibres for Flexible Pressure Sensors. *Materials*, 13(22), 5150, <https://doi.org/10.3390/ma13225150>, 2020.
 51. Bartsch V., von Arnim V., Kuijpers S., Haupt M., Stegmaier T., Gresser G. T.: New Flexible Protective Coating for Printed Smart Textiles. *Applied Sciences-Basel*, 11(2), 664, <https://doi.org/10.3390/app11020664>, 2021.
 52. Halder O., Layani-Tzadka M. E., Sharabani S. Z., Markovich G., Sitt A.: Metal nanowires grown in situ on polymeric fibres for electronic textiles. *Nanoscale Advances*, 4(5), 1368–1374, <https://doi.org/10.1039/d1na00872b>, 2022.
 53. Tabaczynska A., Dabrowska A., Maslowski M., Strakowska A.: Mechanical and Electrical Performance of Flexible Polymer Film Designed for a Textile Electrically-Conductive Path. *Materials*, 14(9), 2169, <https://doi.org/10.3390/ma14092169>, 2021.
 54. Lemic F., Abadal S., Han C., Marquez-Barja J. M., Alarcon E., Famaey J.: Localization in power-constrained Terahertz-operating software-defined metamaterials. *Nano Communication Networks*, 30, 100365, <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2021.100365>, 2021.
 55. Jang J., Kim S., Lee K., Park S., Park G.-Y., Kim B.-J., Oh J., Lee M. J.: Knitted strain sensor with carbon fiber and aluminum-coated yarn, for wearable electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(46), 16440–16449, <https://doi.org/10.1039/d1tc01899j>, 2021.
 56. Rauf S., Vijjapu M. T., Andres M. A., Gascon I., Roubeau O., Eddaoudi M., Salama K. N.: Highly Selective Metal-Organic Framework Textile Humidity Sensor. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 12(26), 29999–30006, <https://doi.org/10.1021/acsami.0c07532>, 2020.

57. Kazani I., Hylli M., Berberi P.: Electrical Resistivity of Conductive Leather and Influence of Air Temperature and Humidity. *Tekstilec*, 64(4), 298–304, <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2021.64.298-304>, 2021.
58. Lesnikowski J.: Effect of Cyclical Bending and Rubbing on the Characteristic Impedance of Textile Signal Lines. *Materials*, 14(20), 6013, <https://doi.org/10.3390/ma14206013>, 2021.
59. Moradi B., Fernandez-Garcia R., Gali I. G.: E-Textile Metamaterials: Stop Band Pass Filter. *Applied Sciences-Basel*, 11(22), 10930, <https://doi.org/10.3390/app112210930>, 2021.
60. Wagih M., Komolafe A., Zaghari B.: Dual-Receiver Wearable 6.78 MHz Resonant Inductive Wireless Power Transfer Glove Using Embroidered Textile Coils. *IEEE Access*, 8, 24630–24642, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971086>, 2020.
61. Veske P., Bauwens P., Bossuyt F., Sterken T., Vanfleteren J.: Development and Washing Reliability Testing of a Stretchable Circuit on Knit Fabric. *Applied Sciences-Basel*, 10(24), 9057, <https://doi.org/10.3390/app10249057>, 2020.
62. Perdigao P., Faustino B. M. M., Faria J., Canejo J. P., Borges J. P., Ferreira I., Baptista A. C.: Conductive Electrospun Polyaniline/Polyvinylpyrrolidone Nanofibers: Electrical and Morphological Characterization of New Yarns for Electronic Textiles. *Fibers*, 8(4), 24, <https://doi.org/10.3390/fib8040024>, 2020.
63. Gao Q., Lauster T., Kopera B. A. F., Retsch M., Agarwal S., Greiner A.: Breathable and Flexible Dual-Sided Nonwovens with Adjustable Infrared Optical Performances for Smart Textile. *Advanced Functional Materials*, 32(5), 2108808, <https://doi.org/10.1002/adfm.202108808>, 2022.
64. Niu L., Miao X., Jiang G., Wan A., Li Y., Liu Q.: Biomechanical energy harvest based on textiles used in self-powering clothing. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1558925020967352, <https://doi.org/10.1177/1558925020967352>, 2020.
65. Lin Q., Gao R., Li D., Lu Y., Liu S., Yu Y., Huang Y., Yu W.: Bamboo-inspired cell-scale assembly for energy device applications. *Npj Flexible Electronics*, 6(1), 13, <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00148-w>, 2022.
66. Rodes-Carbonell A. M., Ferri J., Garcia-Breijo E., Bou-Belda E.: A preliminary study of printed electronics through flexography impression on flexible substrates. *Industria Textila*, 72(2), 133–137 <https://doi.org/10.35530/IT.072.02.202024>, 2021.

67. Ji X., Liu W., Yin Y., Wang C., Torrisi F.: A graphene-based electro-thermochromic textile display. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(44), 15788–15794, <https://doi.org/10.1039/d0tc03144e>, 2020.
68. Wagih M., Hilton G. S., Weddell A. S., Beeby S.: Dual-Polarized Wearable Antenna/Rectenna for Full-Duplex and MIMO Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT). *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2, 844–857, <https://doi.org/10.1109/OJAP.2021.3098939>, 2021.
69. Jankowski-Mihułowicz P., Kalita W., Pawłowicz B.: Problem of dynamic change of tags location in anticollision RFID systems. *Microelectronics Reliability*, 48(6), 911–918, 2008.
70. Jankowski-Mihułowicz P., Węglarski M.: Determination of 3-Dimensional Interrogation Zone in Anticollision RFID Systems with Inductive Coupling by Using Monte Carlo Method. *Acta Physica Polonica A*, 121(4), 936–940, 2012.
71. Jankowski-Mihułowicz P., Węglarski M.: Determination of Passive and Semi-Passive Chip Parameters Required for Synthesis of Interrogation Zone in UHF RFID Systems. *Elektronika i Elektrotechnika (Electronics and Electrical Engineering)*, 20(9), 65–73, 2014.
72. Jankowski-Mihułowicz P., Kalita W.: Application of Monte Carlo Method for Determining the Interrogation Zone in Anticollision Radio Frequency Identification Systems, [in:] C. Turcu (ed.), *Current Trends and Challenges in RFID*, Chapter 17, Croatia: INTECH, 335–356, 2011.
73. Jankowski-Mihułowicz P., Węglarski M.: Determination of Passive and Semi-Passive Chip Parameters Required for Synthesis of Interrogation Zone in UHF RFID Systems. *Elektronika i Elektrotechnika (Electronics and Electrical Engineering)*, 20(9), 65–73, 2014.
74. Jankowski-Mihułowicz P., Kalita W., Skoczylas M., Węglarski M.: Modelling and Design of HF RFID Passive Transponders with Additional Energy Harvester. *International Journal of Antennas and Propagation*, 242840, 1–10, 2013.
75. Jankowski-Mihułowicz P., Kawalec D., Węglarski M.: Antenna Design for Semi-Passive UHF RFID Transponder with Energy Harvester. *Radioengineering*, 24(3), 722–728, 2015.

76. Jankowski-Mihułowicz P., Tomaszewski G., Węglarski M.: Flexible Antenna Design For HF RFID Semi-Passive Transponder In Ink-Jet Technology. *Przegląd Elektrotechniczny*, 4, 1–5, 2015.
77. Jankowski-Mihułowicz P., Węglarski M., Pitera G., Kawalec D., Lichoń W.: Development board of the autonomous semi-passive RFID transponder. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 64(3), 647–654, 2016.
78. Ziółkowski B., Piecuch T., Jankowska-Mihułowicz M., Chudy-Laskowska K.: Rozwój systemów RFID w przedsiębiorstwach. Wyniki badań metodą delficką, pod red. B. Ziółkowskiego i M. Jankowskiej-Mihułowicz, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2016.
79. Wicaksono I., Tucker C., Sun T., Guerrero C. A., Liu C., Woo W. M., Pence E. J., Dagdeviren C.: A tailored, electronic textile conformable suit for large-scale spatiotemporal physiological sensing in vivo. *Npj Flexible Electronics*, 4(1), 5, <https://doi.org/10.1038/s41528-020-0068-y>, 2020.
80. Logothetis I., Vatansever Bayramol D., Gil I., Dabnichki P., Pirogova E.: Evaluating silver-plated nylon (Ag/PA66) e-textiles for bioelectrical impedance analysis (BIA) application. *Measurement Science and Technology*, 31(7), 075101, <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab78c3>, 2020.
81. Li M., Xiong W., Li Y.: Wearable Measurement of ECG Signals Based on Smart Clothing. *International Journal of Telemedicine and Applications*, 6329360, <https://doi.org/10.1155/2020/6329360>, 2020.
82. Amelard R., Hedge E. T., Hughson R. L.: Temporal convolutional networks predict dynamic oxygen uptake response from wearable sensors across exercise intensities. *Npj Digital Medicine*, 4(1), 156, <https://doi.org/10.1038/s41746-021-00531-3>, 2021.
83. Valisevskis A., Briedis U., Carvalho M., Ferreira F.: Development of flexible textile aluminium-air battery prototype. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 10(1), 6, <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00191-z>, 2021.
84. Golparvar A. J., Yapici M. K.: Toward graphene textiles in wearable eye tracking systems for human-machine interaction. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 12, 180–189, <https://doi.org/10.3762/bjnano.12.14>, 2021.
85. Marra F., Minutillo S., Tamburrano A., Sarto M. S.: Production and characterization of Graphene Nanoplatelet-based ink for smart textile strain sensors via screen

- printing technique. *Materials & Design*, 198, 109306, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109306>, 2021.
86. Hughes-Riley T., Jobling P., Dias T., Faulkner S. H.: An investigation of temperature-sensing textiles for temperature monitoring during sub-maximal cycling trials. *Textile Research Journal*, 91(5–6), 624–645, <https://doi.org/10.1177/0040517520938144>, 2021.
 87. Rehman A., Houshyar S., Reineck P., Padhye R., Wang X.: Multifunctional Smart Fabrics through Nanodiamond-Polyaniline Nanocomposites. *Acs Applied Polymer Materials*, 2(11), 4848–4855, <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c00789>, 2020.
 88. Mukai Y., Suh M.: Development of a conformal woven fabric antenna for wearable breast hyperthermia. *Fashion and Textiles*, 8(1), 7, <https://doi.org/10.1186/s40691-020-00231-8>, 2021.
 89. Zhang J., Li X., Guo J., Zhou G., Xiang L., Wang S., He Z.: Novel TiO₂/TPU composite fiber-based smart textiles for photocatalytic applications. *Materials Advances*, 3(3), 1518–1526. <https://doi.org/10.1039/d1ma01200b>, 2022.
 90. Kianfar P., Abate M. T., Trovato V., Rosace G., Ferri A., Bongiovanni R., Vitale A.: Surface Functionalization of Cotton Fabrics by Photo-Grafting for pH Sensing Applications. *Frontiers in Materials*, 7, 39, <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00039>, 2020.
 91. Krisciunaite J., Kalendraite B., Rageliene L., Merkelyte E., Mikucioniene D.: Durable Wash-Resistant Antimicrobial Treatment of Knitted Fabrics. *Autex Research Journal*, 5 Jun, <https://doi.org/10.2478/aut-2021-0009>, 2021.
 92. Tessarolo M., Possanzini L., Gualandi I., Mariani F., Torchia L. D., Arcangeli D., Melandri F., Scavetta E., Fraboni B.: Wireless Textile Moisture Sensor for Wound Care. *Frontiers in Physics*, 9, 722173, <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.722173>, 2021.
 93. Xiao G., Ju J., Lu H., Shi X., Wang X., Wang W., Xia Q., Zhou G., Sun W., Li C. M., Qiao Y., Lu Z.: A Weavable and Scalable Cotton-Yarn-Based Battery Activated by Human Sweat for Textile Electronics. *Advanced Science*, 6 January, 2103822, <https://doi.org/10.1002/advs.202103822>, 2022.
 94. Akgun D. E., Senol Y., Yesilpinar S.: Design of a TENS knee pad with integrated textile electrodes. *Industria Textila*, 72(3), 268–273, <https://doi.org/10.35530/IT.072.03.1700>, 2021.

95. Son Y., Lee S., Choi Y., Han S., Won H., Sung T.-H., Choi Y., Bae J.: Design framework for a seamless smart glove using a digital knitting system. *Fashion and Textiles*, 8(1), 6, <https://doi.org/10.1186/s40691-020-00237-2>, 2021.
96. Ramachandran V., Schilling F., Wu A. R., Floreano D.: Smart Textiles that Teach: Fabric-Based Haptic Device Improves the Rate of Motor Learning. *Advanced Intelligent Systems*, 3(11), 2100043, <https://doi.org/10.1002/aisy.202100043>, 2021.
97. Verleysen A., Holvoet T., Proesmans R., Den Haese C., Wyffels F.: Simpler Learning of Robotic, Manipulation of Clothing by Utilizing DIY Smart Textile Technology. *Applied Sciences-Basel*, 10(12), 4088, <https://doi.org/10.3390/app10124088>, 2020.
98. Vevere A., Oks A., Katashev A., Terlecka G., Saiva L., Jansons M., Dyachenko N., Seglina P.: Smart textile device for shooter's fingers movement monitoring. *Technology and Health Care*, 30(1), 217–229, <https://doi.org/10.3233/THC-219005>, 2022.
99. Inkarbo, Katalog produktów, <https://www.inkarbo.com/catalog/primenenie-uglevolokna/ekranirovanie-elektromagnitnogo-izlucheniya/>, dostęp: 13.04.2022.
100. Wang H., Wang H., Wang Y., Su X., Wang C., Zhang M., Jian M., Xia K., Liang X., Lu H., Li S., Zhang Y.: Laser Writing of Janus Graphene/Kevlar Textile for Intelligent Protective Clothing. *Acs Nano*, 14(3), 3219–3226, <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b08638>, 2020.
101. Wang C., Kim Y., Kim D. G., Lee S. H., Min S. D.: Smart Helmet and Insole Sensors for Near Fall Incidence Recognition during Descent of Stairs. *Applied Sciences-Basel*, 10(7), 2262, <https://doi.org/10.3390/app10072262>, 2020.
102. Wang C., Kim Y., Lee S. H., Sung N.-J., Min S. D., Choi M.-H.: Activity and Safety Recognition using Smart Work Shoes for Construction Worksite. *Ksii Transactions on Internet and Information Systems*, 14(2), 654–670, <https://doi.org/10.3837/tiis.2020.02.010>, 2020.
103. Riabchykov M., Alexandrov A., Trishch R., Nikulina A., Korolyova N.: Prospects for the Development of Smart Clothing with the Use of Textile Materials with Magnetic Properties. *Tekstilec*, 65(1), 36–43, <https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2021050>, 2022.
104. Kapsali V., Vincent, J.: From a Pinecone to Design of an Active Textile. *Biomimetics*, 5(4), 52, <https://doi.org/10.3390/biomimetics5040052>, 2020.

105. Guo T., Wan Z., Li D., Song J., Rojas O. J., Jin Y.: Intermolecular self-assembly of dopamine-conjugated carboxymethylcellulose and carbon nanotubes toward supertough filaments and multifunctional wearables. *Chemical Engineering Journal*, 416, 128981, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128981>, 2021.
106. Wang Y., Ren J., Ye C., Pei Y., Ling S.: Thermochromic Silks for Temperature Management and Dynamic Textile Displays. *Nano-Micro Letters*, 13(1), 72, <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00591-w>, 2021.
107. Corcione C. E., Ferrari F., Striani R., Greco A.: Transport Properties of Natural and Artificial Smart Fabrics Impregnated by Graphite Nanomaterial Stacks. *Nanomaterials*, 11(4), 1018, <https://doi.org/10.3390/nano11041018>, 2021.
108. Sanchez V., Payne C. J., Preston D. J., Alvarez J. T., Weaver J. C., Atalay A. T., Boyvat M., Vogt D. M., Wood R. J., Whitesides G. M., Walsh C. J.: Smart Thermally Actuating Textiles. *Advanced Materials Technologies*, 5(8), 2000383, <https://doi.org/10.1002/admt.202000383>, 2020.
109. Kim G., Gardner C., Park K., Zhong Y., Jin S.: Human-Skin-Inspired Adaptive Smart Textiles Capable of Amplified Latent Heat Transfer for Thermal Comfort. *Advanced Intelligent Systems*, 2(12), 2000163, <https://doi.org/10.1002/aisy.202000163>, 2020.
110. Peng L., Shen L., Fan W., Liu Z., Qiu H., Yu A., Jiang X. (b.d.). Ag/VO₂/Ag sandwich nylon film for smart thermal management and thermo-responsive electrical conductivity. *Journal of Industrial Textiles*, February 2, 1528083720986542, <https://doi.org/10.1177/1528083720986542>, 2021.
111. Guan X., Wang X., Huang Y., Zhao L., Sun X., Owens H., Lu J. R., Liu X.: Smart Textiles with Janus Wetting and Wicking Properties Fabricated by Graphene Oxide Coatings. *Advanced Materials Interfaces*, 8(2), 2001427, <https://doi.org/10.1002/admi.202001427>, 2021.
112. Ibanez-Labiano I., Alomainy A.: Dielectric Characterization of Non-Conductive Fabrics for Temperature Sensing through Resonating Antenna Structures. *Materials*, 13(6), 1271, <https://doi.org/10.3390/ma13061271>, 2020.
113. Bartkowiak G., Dabrowska A., Greszta A.: Development of Smart Textile Materials with Shape Memory Alloys for Application in Protective Clothing. *Materials*, 13(3), 689, <https://doi.org/10.3390/ma13030689>, 2020.

114. Aziz S., Martinez J. G., Foroughi J., Spinks G. M., Jager E. W. H.: Artificial Muscles from Hybrid Carbon Nanotube-Polypyrrole-Coated Twisted and Coiled Yarns. *Macromolecular Materials and Engineering*, 305(11), 2000421, <https://doi.org/10.1002/mame.202000421>, 2020.
115. Li Y., Miao M.: Water-responsive artificial muscles from commercial viscose fibers without chemical treatment. *Materials Research Letters*, 8(6), 232–238, <https://doi.org/10.1080/21663831.2020.1743787>, 2020.
116. Aziz S., Martinez J. G., Salahuddin B., Persson N.-K., Jager E. W. H.: Fast and High-Strain Electrochemically Driven Yarn Actuators in Twisted and Coiled Configurations. *Advanced Functional Materials*, 31(10), 2008959, <https://doi.org/10.1002/adfm.202008959>, 2021.
117. Wu Y., Mechael S. S., Lerma C., Carmichael R. S., Carmichael T. B.: Stretchable Ultrasheer Fabrics as Semitransparent Electrodes for Wearable Light-Emitting e-Textiles with Changeable Display Patterns. *Matter*, 2(4), 882–895, <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.01.017>, 2020.
118. Choi S., Jo W., Jeon Y., Kwon S., Kwon J. H., Son Y. H., Kim J., Park J. H., Kim H., Lee H. S., Nam M., Jeong E. G., Bin Shin J., Kim T.-S., Choi K. C.: Multi-directionally wrinkle-able textile OLEDs for clothing-type displays. *Npj Flexible Electronics*, 4(1), 33, <https://doi.org/10.1038/s41528-020-00096-3>, 2020.
119. Jeong S. Y., Shim H. R., Na Y., Kang K. S., Jeon Y., Choi S., Jeong E. G., Park Y. C., Cho H.-E., Lee J., Kwon J. H., Im S. G., Choi K. C.: Foldable and washable textile-based OLEDs with a multi-functional near-room-temperature encapsulation layer for smart e-textiles. *Npj Flexible Electronics*, 5(1), 15, <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00112-0>, 2021.
120. Yamamoto M., Karasawa R., Okuda S., Takamatsu S., Itoh T.: Continuous microcorrugation process for wearable applications. *Engineering Reports*, 2(3), 12143, <https://doi.org/10.1002/eng2.12143>, 2020.
121. Fan H., Li Q., Li K., Hou C., Zhang Q., Li Y., Wang H.: Stretchable electrothermochromic fibers based on hierarchical porous structures with electrically conductive dual-pathways. *Science China-Materials*, 63(12), 2582–2589, <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1404-y>, 2020.

122. Verpaalen R. C. P., Engels T., Schenning A. P. H. J., Debije M. G.: Stimuli-Responsive Shape Changing Commodity Polymer Composites and Bilayers. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 12(35), 38829–38844, <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10802>, 2020.
123. Loh G. H., Sotayo A., Pei E.: Development and testing of material extrusion additive manufactured polymer-textile composites. *Fashion and Textiles*, 8(1), 2, <https://doi.org/10.1186/s40691-020-00232-7>, 2021.
124. Orzan C. M., Zara I. A.: Smart textiles perspective for the Romanian fashion industry, *Industria Textila*, 71(6), 572–575, <https://doi.org/10.35530/IT.071.06.202018>, 2020.
125. Li Q., Xue Z., Wu Y., Zeng X.: The Status Quo and Prospect of Sustainable Development of Smart Clothing. *Sustainability*, 14(2), 990, <https://doi.org/10.3390/su14020990>, 2022.
126. Esbeih K. N., Molina-Moreno V., Nunez-Cacho P., Silva-Santos B.: Transition to the Circular Economy in the Fashion Industry: The Case of the Inditex Family Business. *Sustainability*, 13(18), 10202, <https://doi.org/10.3390/su131810202>, 2021.
127. Ahmad S., Miskon S., Alabdan R., Tlili I.: Towards Sustainable Textile and Apparel Industry: Exploring the Role of Business Intelligence Systems in the Era of Industry 4.0. *Sustainability*, 12(7), 2632, <https://doi.org/10.3390/su12072632>, 2020.
128. Fu Q., Sial M. S., Arshad M. Z., Comite U., Thu P. A., Popp J.: The Inter-Relationship between Innovation Capability and SME Performance: The Moderating Role of the External Environment. *Sustainability*, 13(16), 9132, <https://doi.org/10.3390/su13169132>, 2021.
129. Nazeer N., Rasiah R., Furuoka F.: Technology Transfer, Technological Capability, Absorptive Capacity and Firm Performance: An Investigation of the Textile and Clothing Firms in Pakistan. *Malaysian Journal of Economic Studies*, 58(1), 99–124, <https://doi.org/10.22452/MJES.vol58no1.6>, 2021.
130. Jankowska-Miśkiewicz M., Chudy-Laskowska K.: Factors influencing investors' decisions in Polish companies as demonstrated by RFID systems, [in:] *Hradec Economic Days 2019*, 9(1), Double-blind peer-reviewed proceedings part I of the international scientific conference, edited by P. Jedlička, P. Marešová and I. Soukal, University of Hradec Králové, Hradec Králové, 317–328, 2019.

131. Grenda M.: Konstrukcje tkane, tkaniny konstruowane. Współczesne metody wytwarzania i pozyskiwania materiałów oraz tkanin w zrównoważonym projektowaniu. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Artystyczny w Poznaniu, Poznań 2016.

Wszelkie prawa autorskie i wydawnicze zastrzeżone. Każda forma powielania oraz przenoszenia na inne nośniki bez pisemnej zgody Wydawcy jest traktowana jako naruszenie praw autorskich, z konsekwencjami przewidzianymi w *Ustawie o prawie autorskim i prawach pokrewnych* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1191 t.j.). Autor i Wydawca dołożyli wszelkich starań, aby rzetelnie podać źródło zamieszczonych ilustracji oraz dotrzeć do właścicieli i dysponentów praw autorskich. Osoby, których nie udało się ustalić, są proszone o kontakt z Wydawnictwem.

p-ISBN 978-83-7934-696-7

e-ISBN 978-83-7934-698-1

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
<https://oficyna.prz.edu.pl>

Ark. wyd. 3,13. Ark. druk. 5,00. Wydrukowano w grudniu 2023 r.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Zam. nr 73/23