

Zamykanie obiegów gospodarczych dzięki technologiom informacyjnym



Fundusze Europejskie

dla Polski Wschodniej



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



PARP
Grupa PFR

Zamykanie obiegów gospodarczych dzięki technologiom informacyjnym

Autorzy raportu:
Hubert Bukowski
Zofia Koch
Natalia Puchalska
Grażyna Puławska

Wykonawca:
Instytut Innowacji i Odpowiedzialnego Rozwoju INNOWO

Opracowanie graficzne i skład:
Neo Grafika Tomasz Sokołowski

© Copyright by Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości

ISBN: 978-83-7633-537-7

Warszawa 2025

Projekt współfinansowany z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego ze środków programu Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej (FEPW) 2021-2027



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



PARP
Grupa PFR



Spis treści

1. Podwójna transformacja – synergia cyfryzacji i zamykania obiegów gospodarczych	4
2. Transformacja gospodarcza a rosnąca rola informacji	10
2.1. Cykl życia dobra a potrzeba cyfryzacji	11
2.2. Rosnące potrzeby informacyjne konsumentów	14
2.3. Rosnące potrzeby informacyjne producentów	15
2.4. Wymagania regulacyjne a potrzeby informacyjne	16
3. Cyfryzacja zbierania i przepływu danych	17
3.1. Standaryzacja oznakowań	18
3.2. Internet Rzeczy (IoT)	21
3.3. Zautomatyzowane systemy wizyjne	22
3.4. Blockchain	25
3.5. Cyfrowe bliźniaki i paszporty produktów	26
3.6. Chmury obliczeniowe i platformy internetowe	28
4. Maszynowe technologie przetwarzania danych w wiedzę	31
4.1. Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe	32
4.2. Big data	36
4.3. Technologie predykcyjne	38
5. Potrzeba minimalizacji efektów zewnętrznych cyfryzacji gospodarki	40
5.1. Zapotrzebowanie na energię	42
5.2. Zapotrzebowanie na materiały krytyczne	42
5.3. Kruchość globalnych łańcuchów dostaw	43



1. Podwójna transformacja – synergia cyfryzacji i zamykania obiegów gospodarczych

Obowiązujący obecnie na świecie model gospodarczy charakteryzuje się marnotrawnym podejściem do zasobów zgodnie z zasadą „weź – wykorzystaj – wyrzuć”. Nic dziwnego, że coraz częściej spotykamy się z rosnącymi cenami surowców i produktów, zwiększoną zmiennością cen, czy wręcz niedoborem dóbr. Z dużą pewnością możemy już stwierdzić, że kontynuowanie prowadzenia działalności gospodarczej według dotychczasowego modelu zakończy się istotnym obniżeniem jakości życia tego i kolejnych pokoleń. W celu przeciwdziałania tym niekorzystnym zmianom możemy dążyć do zmiany modelu gospodarowania w kierunku wykorzystania zasobów, którymi już dysponujemy w granicach planetarnych, ograniczając ilość generowanych odpadów i marnotrawstwo. Oznacza to, ponowne wykorzystanie dóbr w całym ich łańcuchu wartości. Możliwe jest dzielenie się dobrami z innymi użytkownikami, redystrybucja, naprawy, modyfikacje, recykling, itp. Model oparty na tego typu zamykaniu obiegów gospodarczych, nazywany jest gospodarką obiegu zamkniętego (gospodarką cyrkularną), zaś proces dążący do jego wdrożenia nazywany jest transformacją cyrkularną. To ambitny projekt mający na celu zapewnienie odpowiedniej jakości życia przy wykorzystaniu jak najmniejszej ilości zasobów.

Transformacja cyrkularna napotyka jednak poważne problemy z implementacją. Po pierwsze funkcjonuje ona w ramach

systemu odziedziczonego po modelu „weź – wykorzystaj – wyrzuć”, tzw. modelu linearnym. Tak więc system podatkowy, systemy raportowania i statystyki, systemy logistyczne, brak śledzenia produktów i ich elementów sprzyja marnotrawieniu zasobów. Po drugie brak jest obecnie efektów skali, które wykazałyby przewagę modelu cyrkularnego. Tego typu problemów nie napotyka transformacja cyfrowa, która ma coraz większy wpływ na funkcjonowanie przedsiębiorstw i społeczeństwa.

Transformacja cyfrowa polega na integracji technologii informacyjnych w gospodarce oraz w codziennym życiu społeczeństwa. Polega ona na digitalizacji dotychczas analogowych produktów, usług lub operacji. Celem jej wdrożenia jest wzrost ilości, ułatwienie przepływu i wykorzystania informacji w gospodarce. Jest ona utożsamiana z dążeniami do wzrostu gospodarczego, ułatwiania globalnego przepływu dóbr i usług, zwiększania możliwości konsumpcyjnych, a więc celami które są charakterystyczne dla modelu linearnego.

Na pierwszy rzut oka transformacja cyfrowa i zamykanie obiegów gospodarczych mogą się więc odznaczać odrębnymi, a nawet rozbieżnymi dążeniami. Jednak, gdy przyjrzymy się bliżej tym dwóm rodzajom transformacji okaże się, że efekty ucyfrowienia (np. automatyzacja procesów lub używanie aplikacji) sprzyjają zamykaniu obiegów gospodarczych. Technologie

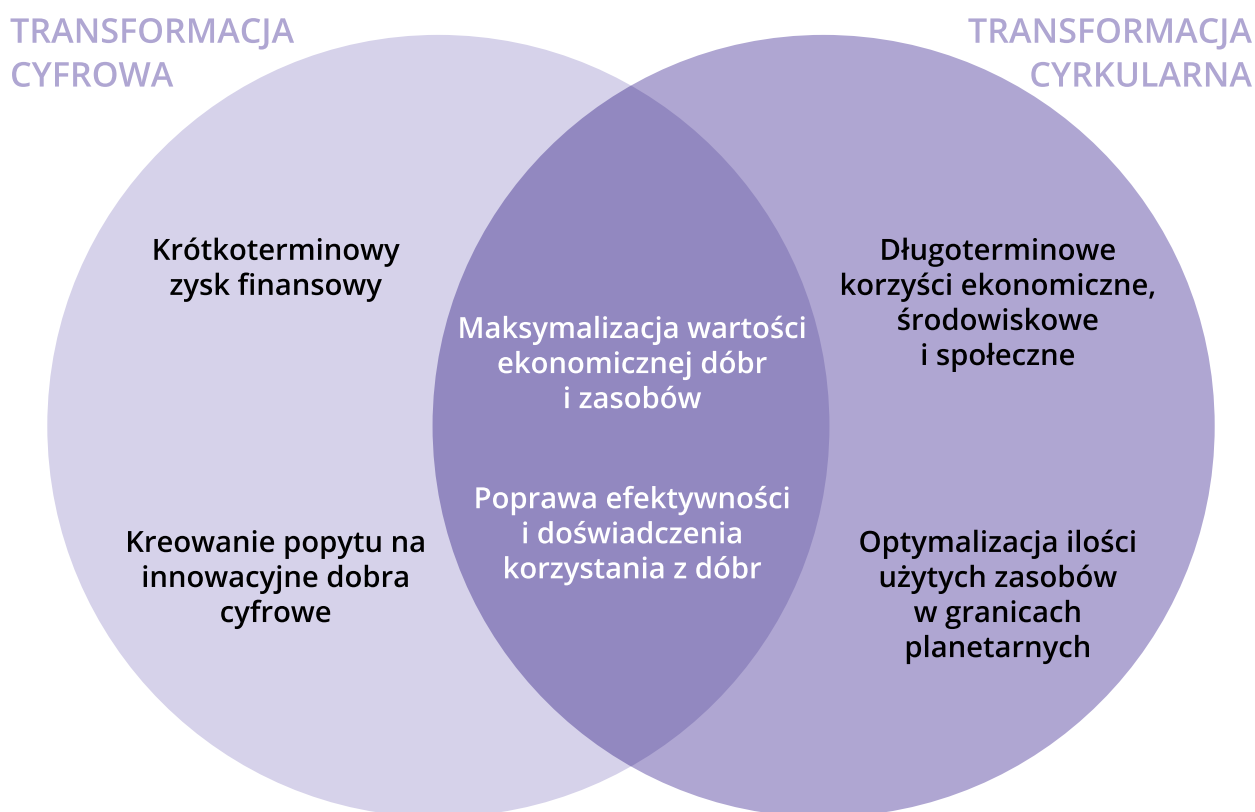
cyfrowe nakierowane są przede wszystkim na efektywne wykorzystanie zasobów, tak fizycznych jak i cyfrowych. Mogą być więc kluczem do odblokowania użyteczności dóbr wymaganej przez model gospodarki obiegu zamkniętego. Innowacje cyfrowe mogą stać się nieodzownym sprzymierzeńcem w naszym dążeniu do zrównoważonego rozwoju.

Innymi słowy transformacja cyrkularna i cyfrowa mogą przebiegać równolegle, wzajemnie wzmacniając swoje działanie¹. Proces ten nazywany jest podwójną transformacją.

Istotne znaczenie cyfryzacji w transformacji cyrkularnej związane jest z faktem, że

informacja jest kluczowa w lepszym wykorzystaniu zasobów. Pozwala ona na zidentyfikowanie dostępnych dóbr i ich wartości, metod ich wykorzystania, interesariuszy zainteresowanych tym procesem. Informacje na temat działalności, takie jak ilość wykorzystanej energii, materiałów, wiedza o sposobach użytkowania, wspomagają wybór najlepszych sposobów produkcji i użytkowania, wspierają projektowanie nowych produktów, pozwalają na śledzenie produktów i tworzenie systemów zwracania zasobów, itd. Śmiało więc można postawić tezę, że **im więcej wartości chcemy uzyskać, tym więcej informacji potrzebujemy.**

Ryc. 1 Schemat celów transformacji cyfrowej i cyrkularnej



Źródło: Opracowanie własne

1. von der Leyen, U. (2019). Unia która mierzy wyżej: Mój program dla Europy. Wytocznice polityczne na następną kadencję Komisji Europejskiej 2019-2024. https://ec.europa.eu/info/files/political-guidelines-new-commission_pl

Wydajność dzięki technologiom informacyjnym²

Firma Arup zaprojektowała węzeł konstrukcyjny z wykorzystaniem m.in. uczenia maszynowego i druku 3D, aby zmniejszyć ilość materiału o ponad 40%. W tym samym czasie niezawodność i inne cechy konstrukcyjne węzła pozostały niezmienione.



Integracja zasad gospodarki o obiegu zamkniętym i technologii cyfrowych prowadzi do zmiany marnotrawnych procesów produkcyjnych na zrównoważone podejście do korzystania z zasobów. Obecnie termin cyfryzacji obejmuje technologie takie jak sztuczna inteligencja (AI), Internet rzeczy (IoT), big data, blockchain i inne omówione dalej w niniejszej publikacji. Są one nakierowane, po pierwsze na gromadzenie i transfer danych, po drugie na przetwarzanie ich w wiedzę pozwalającą na uzyskanie korzyści ekonomicznych.

Wykorzystanie technologii cyfrowych może skutkować zwiększeniem innowacyjności i wydajności, a więc maksymalizacją wartości ekonomicznej, społecznej i środowiskowej w jak najdłuższym okresie. Właśnie to jest sednem dążeń modelu gospodarki obiegu zamkniętego.

2. Źródło: <https://constructionmanagement.co.uk/arup-pioneers-3d-printed-steel-nodes/>

Innowacje lekowe stworzone dzięki sztucznej inteligencji³

Cząsteczka - znana jako DSP-1181 - została stworzona przy użyciu algorytmów sztucznej inteligencji, które selekcjonowały potencjalne związki, sprawdzając je w ogromnej bazie danych według zadanych parametrów. Tego typu użycie technologii informacyjnych pozwoliło na przejście do etapu testów klinicznych po zaledwie 12 miesiącach, wobec standardowych 5 lat. Lek przechodzi obecnie kolejne testy. Potencjalnie będzie stosowany w leczeniu pacjentów z zaburzeniami obsesyjno-kompulsywnymi (OCD).

Przejście na gospodarkę o obiegu zamkniętym, przy równoczesnym ucyfrowieniu nie jest jednak pozbawione wyzwań. Istnieją pewne rozbieżności między dwoma koncepcjami. Po pierwsze, standardowo rozumiana transformacja cyfrowa jest nakierowana na krótkoterminowy zysk. Wynika to z faktu, że firmy odpowiedzialne za innowacyjne usługi i produkty cyfrowe, działają w dużej mierze w sposób odziedziczony po modelu gospodarki linearnej. Po drugie, transformacja cyfrowa nie bierze pod uwagę ograniczeń zasobowych naszej planety. W rezultacie technologie cyfrowe w fazie szybkiego wzrostu powodują niebagatelną presję na zasoby ziemi⁴ (patrz rozdział 5). Przykłady, w których transformacja cyfrowa koliduje z ekologią, obejmują produkcję i utylizację urządzeń cyfrowych, co prowadzi do problemów

takich jak odpady elektroniczne oraz kwestie natury rynkowej i etycznej związane z wydobyciem tzw. minerałów krytycznych. Znaczące jest również wyzwanie związane ze zwiększonym zużyciem energii ze względu na rozrastanie się centr danych, technologii blockchain czy upowszechnienie korzystania ze sztucznej inteligencji. W takich wypadkach firmy często nie zwracają uwagi na źródło pochodzenia energii potrzebnej do funkcjonowania nowych produktów i usług. Decydują się więc na korzystanie z już dostępnych źródeł energii, w tym paliw kopalnych.

Nie należy przy tym zapominać, że pochopte wdrażanie innowacji technologicznych w wielkiej skali, nie dbając o ich efekty zewnętrzne, może działać kontrproduktywnie dla

3. Źródło: <https://www.bbc.com/news/technology-51315462>

4. Znaczący jest tu również mechanizm ekonomiczny, nazywany paradoksem Jevonsa. Zakłada on, że im efektywniej wykorzystywany jest dany surowiec, tym bardziej rośnie jego zużycie. Innymi słowy wzrost efektywności wykorzystywania zasobów materialnych wynikający z lepszego korzystania z informacji powoduje, nie jak by się mogło wydawać spadek popytu na te zasoby, ponieważ te same potrzeby możemy zaspokoić przy mniejszym ich zaangażowaniu, lecz wzrost potrzeb a także wykorzystywanych w tym celu zasobów, wynikający z łatwiejszego/tańszego/efektywniejszego wykorzystywania zasobów.

podwójnej transformacji w długim okresie. Przedłużanie korzystania ze starych technologii pozyskania energii, czy wykorzystania zasobów po to aby napędzać szybką popularyzację innowacji cyfrowych może utrwalać gospodarkę linearną. Ta z kolei nie jest nastawiona na korzystanie z technologii cyfrowych w takim stopniu jak gospodarka obiegu zamkniętego. W rezultacie możemy mieć do czynienia ze zmniejszeniem popytu na innowacje cyfrowe w długim terminie.

Podsumowując, podwójna transformacja, a więc jednoczesne wdrażanie transformacji cyfrowej i cyrkularnej, może skutkować zjawiskiem synergii. Tak więc oba procesy mogą być wzmacniane

w porównaniu do wdrażania ich w sposób oddzielny. Zamykanie obiegów gospodarczych może okazać się znacznie szybsze przy zastosowaniu technologii cyfrowych. Z kolei innowacje informacyjne zyskują większe znaczenie i dużo szersze możliwości zastosowania, w porównaniu ze standardowym modelem gospodarki, który zdecydowanie w mniejszym stopniu korzysta z wszelkiego rodzaju danych. W rezultacie współdziałania cyfryzacji wdrażanej w sposób zrównoważony i zamykania obiegów gospodarczych zwiększamy szansę na efektywną zmianę sposobu w jaki produkujemy i konsumujemy, z korzyścią dla naszego życia, konkurencyjności przedsiębiorstw oraz stanu naszej planety.

Dopasowanie produkcji do popytu dzięki wsparciu sztucznej inteligencji⁵

Firma H&M wykorzystuje big data do analizy potrzeb klientów na poziomie lokalnym. Sztuczna inteligencja analizuje paragony sklepowe, zwroty w sklepie i dane dotyczące kart lojalnościowych, aby zbadać wymagania klientów. Ponadto algorytmy analizują posty na blogach i wyszukiwarki, aby zebrać więcej informacji o trendach w modzie. W efekcie firma może produkować właściwe produkty w ilości odpowiadającej realnemu zapotrzebowaniu oraz alokować je we właściwe miejsce, co ogranicza marnotrawstwo i koszty produkcji. Przy okazji zwiększona wiedza o potrzebach konsumentów skróciła czas wprowadzania produktów na rynek z ok. 12 do 6 miesięcy.

5. Źródło: <https://analyticsindiamag.com/ai-features/how-artificial-intelligence-is-driving-growth-at-hm/>



2. Transformacja gospodarcza a rosnąca rola informacji

2.1. Cykl życia dobra a potrzeba cyfryzacji

Odziedziczony model gospodarczy najprościej opisywany jako „weź-wykorzystaj-wyrzuć”, nie korzysta z dużej ilości danych. Kluczowe w działalności w ramach tego modelu są informacje odnośnie dochodów

i kosztów finansowych, które decydują o krótkoterminowym zysku. Tak więc wiedza o zasobach po momencie sprzedaży dóbr, co do zasady nie jest uwzględniana w działalności gospodarczej. Inaczej rzecz się ma w przypadku modelu gospodarki obiegu zamkniętego, którego potrzeby informacyjne są zdecydowanie wyższe. Każde zamykanie obiegów gospodarczych wymaga dużej ilości danych. Najlepiej jeżeli dotyczą one wszystkich etapów cyklu życia produktu.

Maksymalizacja wartości budynku i jego elementów dzięki wykorzystaniu szczegółowych danych⁶

Madaster to internetowy rejestr, w którym przechowywane są dane o materiałach i produktach stosowanych w konkretnym budynku. Zawiera szczegółowe dane na temat ilości i rodzaju stosowanych materiałów, modyfikacjach i remontach, w podziale na strukturę budynku. Pozwala to na łatwą konserwację, ale również na traktowanie budynku jako banku materiałów, aby na koniec swego życia przedstawiał on wartość, a nie koszt dla właściciela. Obecnie rejestr zawiera dane nt. 25 milionów m² powierzchni budynków. Tak duża ilość danych nie byłaby możliwa do zarządzania i wykorzystania bez zastosowania technologii informacyjnych, m.in. chmury obliczeniowej.

THE GREEN HOUSE UTRECHT

GENERAL ► BUILDING BUILDING PROCESS CIRCULARITY FINANCIAL DOSSIER APPS USERS

FILTER VIEW

	TOTALS	SITE	STRUCTURE	SKIN	SERVICES	SPACE PLAN	STUFF	UNKNOWN
TOTALS	858.16 m ³ 1.38 kt	3.21 m ³ 7.05 t	242.16 m ³ 634.66 t	382.23 m ³ 281.55 t	5.62 m ³ 13.18 t	221.88 m ³ 430.94 t	0 m ³ 0 g	3.06 m ³ 7.82 t
PRODUCTS	537	5	359	70	35	68	0	0
STONE	31% 264.87 m ³ 610.98 t	100% 3.21 m ³ 7.05 t	37% 88.56 m ³ 212.54 t	0% 115.88 dm ³ 6.61 kg	0% 0 m ³ 0 g	78% 172.98 m ³ 391.39 t	0% 0 m ³ 0 g	0% 0 m ³ 0 g
GLASS	3% 28.57 m ³ 41.46 t	0% 0 m ³ 0 g	0% 0 m ³ 0 g	0% 629.72 dm ³ 1.57 t	78% 4.39 m ³ 10.98 t	9% 20.53 m ³ 21.35 t	0% 0 m ³ 0 g	99% 3.02 m ³ 7.56 t

6. Źródło: <https://madaster.com/>

Zamykać obiegi gospodarcze można na wiele różnych sposobów, lecz kluczowy dla efektywności wszystkich tych metod jest wydajny przepływ dostępnej i wiarygodnej informacji. Wykorzystywanie danych może przyczyniać się do optymalnego pozyskiwania wartości ekonomicznej z zasobów, zużywania mniejszej ilości materiałów i energii, zmniejszania emisji, minimalizowania ilości odpadów, czy współdzielenia dóbr. Dostęp do danych może ulepszyć proces projektowania produktów i wspierać „naprawialność” produktów. Wreszcie zapewnienie odpowiedniej informacji może samo w sobie stanowić sedno modelu biznesowego nakierowanego na zrównoważoną działalność.

Rzetelne zbieranie i przekształcanie dużych ilości danych jest dużym wyzwaniem operacyjnym oraz organizacyjnym. Oprócz przepływu informacji między różnymi **podmiotami ważne jest, aby zapewnić możliwość podążania danych za konkretnym produktem, czy nawet jego elementem przez cały cykl jego życia**, tak aby proces ten był możliwie prosty i tani. Dlatego coraz częściej korzysta się z rozwiązań maszynowych. De facto bez transformacji cyfrowej nie jest możliwe efektywne wdrożenie modelu gospodarki obiegu zamkniętego. Obecnie przełomowe technologie informacyjne umożliwiają

transformację cyrkularną na każdym etapie cyklu życia dobra.

Przykładowo sztuczna inteligencja jest wykorzystywana w handlu do zarządzania ryzykiem w całym łańcuchu dostaw, może pomóc zautomatyzować i ulepszyć infrastrukturę recyklingu odpadów oraz wydłużyć żywotność dóbr poprzez konserwację predykcyjną⁷. Technologia Blockchain może pomóc w zwiększeniu przejrzystości i identyfikowalności łańcucha dostaw: poprzez zmniejszenie ilości odpadów, ułatwienie naprawy⁸ oraz zwiększenie widoczności przepływów materiałów odpadowych, które można poddać recyklingowi lub ponownie wykorzystać⁹. Technologia Big Data może leżeć u podstaw optymalizacji i usprawnienia procesu przepływu dóbr w łańcuchów dostaw i może pomóc w wydobyciu istotnych informacji o produktach i materiałach na różnych etapach cyklu życia produktu¹⁰.

Poniżej przedstawiono rodzaje danych wykorzystywanych w modelu gospodarki obiegu zamkniętego w całym cyklu życia dóbr. Równocześnie zwrócono uwagę na korzyści możliwe do osiągnięcia i technologie cyfrowe, które możliwe są do wykorzystania na poszczególnych etapach cyklu życia dóbr.

7. Źródło: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/3911fc04a84fcb05/original/Accelerating-the-circular-economy-through-commercial-deconstruction-and-reuse.pdf>

8. Ferreira i in. (2023): Boosting additive circular economy ecosystems using blockchain: An exploratory case study. *Computers & Industrial Engineering* Volume 175, January 2023, 108916

9. Źródło: <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1850561/FULLTEXT01.pdf>

10. Gupta i in. (2019): Circular economy and big data analytics: A stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change* Volume 144, July 2019, Pages 466-474

Ryc. 2 Zapotrzebowanie na dane, korzyści i możliwe technologie cyfrowe wykorzystywane na poszczególnych etapach cyklu życia dóbr w modelu gospodarki obiegu zamkniętego.

Etap cyklu życia	Rodzaj danych	Wybrane korzyści cyrkularne	Przykładowe technologie cyfrowe
Zaopatrzenie w zasoby 	Dane o zaopatrzeniu w materiały i elementy, ich pochodzeniu i składzie materiałowym dóbr	Spełnienie wymogów prawa i oczekiwań klienta odnośnie zrównoważonego pochodzenia	Blockchain do śledzenia łańcucha dostaw
Produkcja 	Dane o projekcie, etapach i miejscach produkcji, produktach ubocznych, możliwościach demontażu itp.	Wsparcie ekoprojektowania, optymalizacja i nadzór produkcji i zapasów	Sztuczna inteligencja w celu wsparcia ekoprojektownia
Dystrybucja 	Dane o położeniu i lokalizacji, środkach transportu itp.	Wsparcie efektywności transportu i magazynowania	Standaryzacja oznakowań w logistyce
Użytkowanie 	Dane nt. sprzedaży, użytkowania, możliwościach napraw, pochodzeniu, składzie itp.	Wybór produktu, wydłużenie długości życia, optymalizacja możliwości i czasu napraw, współdzielenie dóbr i użytkowanie ich jako usługi	Internet Rzeczy w celu konserwacji predykcyjnej
Zagospodarowanie odpadu	Dane nt. lokalizacji dóbr, zdolności do ponownego użycia, odzysku zasobów itp.	Optymalizacja recyklingu, odzysku elementów, zapewnienie separacji materiałów niebezpiecznych	Platformy internetowe wymiany zasobów

Źródło: opracowanie własne.

Nietrudno zauważyć, że w ślad za zamykaniem obiegów zasobów idzie zamykanie obiegu informacji. Innymi słowy, aby zasoby mogły być wykorzystywane ponownie na różnych etapach cyklu życia produktu, konieczny jest przepływ informacji między tymi etapami. Przykładowo, w celu optymalnego ekoprojektowania na etapie produkcji, potrzebujemy danych o użytkowaniu, zaś chcąc odpowiednio zagospodarować zasoby na koniec cyklu życia produktu

należy mieć informację o jego składzie materiałowym. Jeszcze raz należy podkreślić, że tak znaczne wymogi co do ilości wykorzystywanych danych, ich dostępności w różnych okresach, nawet dekad, a także dzielenia się nimi z tysiącami, jeżeli nie milionami podmiotów, wymaga wykorzystania rozwiązań cyfrowych. Rosnące wymagania co do ilości, rzetelności i dostępności danych dotyczą zaś zarówno konsumentów, producentów jak i regulatorów.

2.2. Rosnące potrzeby informacyjne konsumentów

Zwracanie uwagi na wpływ produktów i usług

Obecnie widoczny jest wzrost zainteresowania produktami o zrównoważonych właściwościach, pochodzeniu czy obniżonych efektach zewnętrznych. Według jednego z badań 48% Polaków jest skłonnych zrezygnować z produktu, który negatywnie oddziałuje na środowisko¹¹. Według innego badania na wybranych grupach produktów (AGD i RTV, produkty spożywcze i kosmetyczne, ubrania) to jakość i trwałość jest głównym czynnikiem wyboru dóbr, a nie ich cena¹². Dostarczanie informacji na temat śladu środowiskowego produktów, ich składu, kosztów użytkowania, świadectw pochodzenia może więc wpływać na decyzje konsumpcyjne.

Ponowne użytkowanie dóbr

Konsumenci są coraz bardziej skłonni do ponownego wykorzystywania dóbr. W tym celu korzystają z rynków i platform dla towarów używanych. Chociaż handel używanymi towarami rozwija się w przypadku niektórych grup produktów, pozostaje on niszową działalnością gospodarczą. Często rynki towarów używanych są mniej przejrzyste niż rynki nowych produktów, co utrudnia konsumentom handel i zakupy. Zastrzeżenia konsumentów co do jakości towarów i brak wiedzy na temat indywidualnych egzemplarzy produktów wydają się stanowić barierę dla upowszechnienia handlu towarami używanymi¹³. Zapewnienie lepszych informacji m.in. o pochodzeniu produktów, ich użytkowaniu, naprawach może zachęcić do handlu nimi poprzez zwiększenie pewności konsumentów co do jakości ponownie użytkowanych produktów.

Umożliwienie współwłasności dóbr

Współdzielenie się dobrami, czy traktowanie produktu jako usługi wymaga zaufania do wszystkich użytkowników. Alternatywą jest zastąpienie tego zaufania rzetelnymi danymi. Trwałe oznaczenie produktów i możliwość zbierania danych o użytkowaniu pozwala na bardziej efektywne ich zagospodarowanie.

Ograniczenie asymetrii informacji

Asymetria informacji między producentem/dystrybutorem a użytkownikiem/konsumentem prowadzi do nieoptymalnego podejmowania decyzji przez tych drugich¹⁴. Na etapie wyboru produktów konsumenci podejmują decyzje, które oparte są na błędnych lub niepełnych danych co może skutkować ograniczoną satysfakcją z zakupu i zwiększonymi efektami zewnętrznymi, takimi jak emisje gazów cieplarnianych czy zwiększenie ilości odpadów. Rzetelna informacja przekazywana konsumentom mogłaby przeciwdziałać tym negatywnym efektom.

11. ARC Rynek i Opinie (2019): *Raport z badania Konsumenci a gospodarka obiegu zamkniętego*

12. Innovo (2021): *Gospodarka Obiegu Zamkniętego. Co na to konsument?*

13. Sandes, Fabio & Leandro, Julio. (2019). *EXPLORING THE MOTIVATIONS AND BARRIERS FOR SECOND HAND PRODUCT CONSUMPTION*. Global Fashion Management Conference. 2019. 292-296. 10.15444/GFMC2019.02.08.05.

14. Rizos, V., Behrens, A., Van der Gaast, W., Hofman, E., Ioannou, A., Kafyeke, T., [...] & Topi, C. (2016). *Implementation of circular economy business models by small and medium-sized enterprises (SMEs): Barriers and enablers*. Sustainability, 8(11), 1212

Aktywizacja konsumentów

Rośnie zapotrzebowanie społeczne na rozwiązania, które są zrównoważone, wygodne, bezpieczne i niezawodne. Zapewnienie ludziom narzędzi, dzięki którym ich potrzeby i obawy odnośnie produktów zostaną wysłuchane może umożliwić im stanie się aktywnymi uczestnikami transformacji cyrkularnej, m.in. poprzez usprawnienie naprawy, czy ponownego zagospodarowania elementów i materiałów.

2.3. Rosnące potrzeby informacyjne producentów

Maksymalizacja efektywności produkcji

Dane nie tylko umożliwiają opracowywanie efektywniejszych rozwiązań i technologii procesu produkcyjnego, ale także pomagają w identyfikowaniu możliwych nowych sposobów gospodarowania zasobami w całym cyklu ich życia i wspierają ocenę wykonalności i opłacalności ekonomicznej działań biznesowych. Nie należy zapominać również o tym, że dane umożliwiają szybszą i dopasowaną odpowiedź na zmieniający się popyt rynkowy i oczekiwania konsumentów.

Współpraca między przedsiębiorstwami

Systemy przepływu informacji między przedsiębiorstwami mogą być użytecznymi narzędziami zapewniającymi większą przejrzystość w łańcuchach wartości, wspierającymi działania w zakresie raportowania oraz ujawniającymi efektywne sposoby gospodarowania zasobami, także w ramach symbiozy przemysłowej. Lepsza wymiana informacji może prowadzić do poprawy produktywności zasobów i zmniejszenia ryzyka biznesowego.

Innowacje i tworzenie popytu na nowe dobra

Postęp gospodarczy oparty jest o wzrost technologiczny. Pomijając odkrycia naukowe, na które natknięto się przypadkiem, w większości przypadków innowacje wymagają oparcia o dane. Chodzi tu nie tylko o potwierdzenie w danych korzyści z innowacji w stosunku do istniejących już technologii, ale przede wszystkim o sprecyzowanie obszarów, w których należy ich szukać, a także zidentyfikowanie popytu na określone innowacyjne dobra i usługi.

Ograniczenie ryzyka w łańcuchu dostaw

Dane umożliwiają zarządzanie niepewnością i ryzykiem w łańcuchach dostaw, zmniejszając podatność na szoki. Zwiększony outsourcing procesów produkcyjnych przyczynił się do obniżenia kosztów, ale spowodował również asymetrię informacji w złożonych łańcuchach dostaw. Niewystarczająca dostępność informacji na temat działalności podmiotów niższego szczebla może prowadzić do nieoptymalnego podejmowania decyzji przez podmioty działające na wyższym szczeblu i odwrotnie. Na przykład pochodzenie i skład zamawianych komponentów może być niewłaściwie raportowany. Podobnie informacje na temat substancji niebezpiecznych stosowanych w produkcji na wcześniejszych etapach łańcucha dostaw mają kluczowe znaczenie dla szybkiego dostosowania się do pojawiających się zmian regulacyjnych dotyczących tych substancji. W większości łańcuchów dostaw informacje te nie są obecnie dostępne lub są dostępne w niewystarczającym stopniu lub nie są skutecznie przekazywane od jednego podmiotu w łańcuchu dostaw do drugiego. Rola danych w tym zakresie będzie więc rosła.

2.4. Wymagania regulacyjne a potrzeby informacyjne

Ograniczanie oddziaływania przedsiębiorstw na środowisko

Wraz ze wzrostem wymogów odnośnie ograniczania oddziaływania przedsiębiorstw na środowisko naturalne rosną wymagania odnośnie raportowania, monitorowania i systemów sprawozdawczych. Podstawą ich działania jest zapewnienie informacji. Przykładem mogą być tutaj wymogi odnośnie odzysku niektórych rodzajów odpadów, lub unijna dyrektywa w sprawie sprawozdawczości w zakresie zrównoważonego rozwoju. Przedmiotem monitorowania stają się również praktyki handlowe firm i ich twierdzenia na temat, ogólnie mówiąc, ekologiczności produktów. Obecnie tylko około połowa konsumentów ufa twierdzeniom przedsiębiorstw dotyczącym ekologiczności. Dyrektywa o nieuczciwych praktykach handlowych ma na celu rozwiązanie tego problemu poprzez zakaz wprowadzania w błąd konsumentów przy użyciu tego typu komunikatów. Możliwe jest przy tym wykorzystanie analiz w rodzaju LCA (Life-Cycle Assessment) i PEF (Product Environmental Footprint) w celu wzmocnienia systemów etykietowania, takich jak wspólnotowy program oznakowania ekologicznego, aby pomóc konsumentom w podejmowaniu bardziej zrównoważonych decyzji zakupowych. Analizy te muszą korzystać z rzetelnych i dokładnych danych, śledząc cały cykl życia badanych produktów.

Internalizacja efektów zewnętrznych

Pod tą enigmatyczną nazwą kryje się próba odzwierciedlenia łącznych konsekwencji oddziaływania dóbr w całym ich cyklu życia na środowisko, społeczeństwo i gospodarkę w cenie produktu. Może to mieć miejsce poprzez odpowiednie systemy podatkowe, handel emisjami gazów cieplarnianych, czy ekomodulacji, czyli obciążania produktów i ich opakowań opłatami w zależności od ich charakterystyki. Wszystkie te działania wymagają rosnącej ilości informacji odnośnie liczby produktów i łącznych ich konsekwencji. Oczywiście obecnie nie ma możliwości przeanalizowania wszystkich efektów związanych z działalnością przedsiębiorstw, w szczególności dotyczy to efektów niemonetarnych. Jednak w przyszłości takie dążenia będą dalej postępować.

Rozszerzona odpowiedzialność producenta

System rozszerzonej odpowiedzialności producenta oznacza zestaw środków podjętych w celu zapewnienia odpowiedzialności finansowej lub finansowej i organizacyjnej producentów za swoje produkty. Innymi słowy, chodzi o to aby „zanieczyszczający płacił”. Obecnie rozszerzona odpowiedzialność producenta dotyczy w szczególności etapu końca życia produktu, a więc finansowania lub organizowania zagospodarowania odpadów. Dodatkowo, szczegółowe przepisy w tej materii odnoszą się obecnie jedynie do odpadów opakowaniowych, elektroodpadów, pojazdów wycofanych z eksploatacji, baterii i akumulatorów, opon i olejów smarowych. W przyszłości należy spodziewać się rozszerzenia odpowiedzialności producenta na inne rodzaje produktów. W dalszej przyszłości możliwy jest scenariusz, w którym własność każdego odpadu i odpowiedzialność za niego zawsze pozostanie przy producencie.



3. Cyfryzacja zbierania i przepływu danych

W erze dynamicznych zmian technologicznych, cyfryzacja staje się kluczowym elementem rozwoju i konkurencyjności małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP). W szczególności, skuteczne zbieranie i zarządzanie danymi nabierają fundamentalnego znaczenia dla usprawnienia procesów operacyjnych, podejmowania trafnych decyzji biznesowych oraz budowania przewagi rynkowej.

Cyfrowe narzędzia i systemy informatyczne umożliwiają przedsiębiorstwom automatyzację procesów, zwiększenie efektywności zbierania danych oraz ich szybszą analizę i udostępnianie. Dzięki temu możliwe jest nie tylko lepsze zrozumienie potrzeb klientów, ale również optymalizacja działań w obszarze produkcji, logistyki czy zarządzania zasobami.¹⁵

3.1. Standaryzacja oznakowań

W gospodarce obiegu zamkniętego kluczową rolę odgrywa możliwość śledzenia poszczególnych dóbr, a często także ich komponentów. Pełna identyfikowalność produktów oraz surowców, z których są wytwarzane, jest niezbędna do maksymalizacji retencji wartości w ramach gospodarki cyrkularnej. Dzięki temu możliwe jest efektywne ponowne wykorzystanie zasobów i minimalizacja strat. O ile w fazach produkcji i dystrybucji możliwe

jest traktowanie produktów w sposób zbiorczy, to w fazie użytkowania oraz końca życia produktu niezbędna jest szczegółowa wiedza na temat konkretnego dobra. To właśnie zachowania konsumentów i wybory podejmowane na końcu cyklu życia produktu decydują o skuteczności zamykania obiegów gospodarczych. Istotne informacje obejmują m.in. skład materiałowy produktu, obecność substancji niebezpiecznych, możliwość rozłożenia na części oraz dostępność lokalnych systemów recyklingu czy kompostowania. Taka wiedza jest istotna nie tylko dla konsumentów podejmujących decyzje o odpowiedzialnym pozbywaniu się odpadów, ale także dla przedsiębiorców, którzy chcą efektywnie zagospodarować te dobra, np. poprzez recykling lub ponowne wykorzystanie komponentów. Dzięki temu możliwe jest zamykanie obiegów gospodarczych i minimalizowanie strat surowców.

Zgodnie z ideą GOZ, odpowiedzialność za produkt powinna obejmować cały jego cykl życia. Oznacza to potrzebę pozyskiwania szczegółowych danych o rosnącej liczbie indywidualnych dóbr, szczególnie w przypadku produktów trwałych, dla których cykle życia mogą być wielokrotnie zamykane. Nawet oznakowanie produktów nietrwałych może przynieść znaczące korzyści, takie jak optymalizacja procesów produkcyjnych czy lepsze zarządzanie odpadami i procesami recyklingu.

15. Źródło: Opracowano na podstawie: <https://netzerocities.app/resource-3577>

Znaczenie standaryzacji w cyfrowym oznakowaniu produktów

W kontekście gospodarki cyrkularnej konieczne jest wdrożenie spójnych i otwartych standardów oznakowań, które umożliwią płynny przepływ danych pomiędzy wszystkimi uczestnikami łańcucha wartości. Dotychczasowy model gospodarowania, oparty na ograniczonym przekazywaniu informacji o produktach, wymaga przełamania „silosowości” i stworzenia otwartego ekosystemu danych. Kluczowe jest, aby standardy były neutralne, inkluzywne i umożliwiały łatwą identyfikację oraz przekazywanie informacji na każdym etapie cyklu życia produktu.

Systemy oznakowania powinny być kompatybilne między sobą, aby umożliwiać łatwe aktualizacje i zapobiegać utracie danych w przypadku zmian technologicznych. Jednocześnie muszą one zapewniać niski koszt implementacji oraz prostotę obsługi, aby ułatwić ich popularyzację. Idealnym rozwiązaniem są tu standardy umożliwiające zarówno integrację w procesach produkcyjnych, jak i wykorzystanie przez konsumentów w procesach recyklingu czy utylizacji.

Obecnie najczęściej stosowane technologie wspierające oznakowanie to:

■ Kody kreskowe i QR – łatwe

w zastosowaniu, tanie i kompatybilne z procesami recyklingu; działają jak cyfrowe paszporty produktów – skanery optyczne odczytują zakodowane w nich dane, takie jak skład materiałowy (np. procentowa zawartość PET w opakowaniu) lub instrukcje recyklingu. Przykładowo, skanując kod na butelce wody, konsument uzyskuje informację, że folię termokurczliwą należy zdjąć przed wrzuceniem do żółtego pojemnika, co minimalizuje błędy w segregacji. W przemyśle te same kody umożliwiają śledzenie historii produktu – fabryka remanufakturująca elektronikę może dzięki nim identyfikować komponenty nadające się do ponownego montażu.

■ Identyfikacja radiowa (RFID)

– umożliwia bezdotykowe i wsadowe przetwarzanie danych, co jest szczególnie istotne w logistyce i masowej dystrybucji. W przeciwieństwie do kodów kreskowych, nie wymaga linii widzenia – paleta opakowań zwrotnych w magazynie może być przeskanowana przez ścianę kontenera.

■ **Markery chemiczne i optyczne** – umożliwiają identyfikację materiałów, takich jak tekstylia czy tworzywa sztuczne, wspierając procesy sortowania i recyklingu.

Każda z tych technologii wnosi wartość na innym etapie cyklu życia produktu. Podczas gdy kody QR edukują konsumentów, technologia RFID optymalizuje logistykę zwrotów, a markery chemiczne zapewniają czystość strumieni recyklingowych. Dzięki ich połączeniu tworzy się systemowa pętla, w której informacje o produkcie nie znikają wraz z jego zużyciem, lecz stają się siłą napędową kolejnych cykli użytkowania.

W wielu branżach – od tekstylnej, przez opakowaniową, po elektroniczną – technologie te umożliwiają tworzenie bardziej cyrkularnych modeli biznesowych, poprawiają transparentność łańcuchów dostaw i wspierają kontrolę jakości. Ponadto, standaryzacja identyfikacji produktów wspomaga realizację regulacji prawnych, takich jak europejski Cyfrowy Paszport Produktu, umożliwiając firmom lepsze raportowanie i spełnianie celów zrównoważonego rozwoju.

Wdrożenie Technologii RFID w handlu tekstyliami¹⁶

Technologia RFID jest coraz popularniejsza w handlu detalicznym, poprawiając efektywność zarządzania zapasami. To był jeden z powodów wdrożenia RFID w sieci Reserved. Głównym celem było usprawnienie zarządzania asortymentem. Proces wdrożenia trwał około roku, co jest rekordem na skalę globalną. Firma przeszkoliła 500 dostawców, aby produkty były wyposażone w metki RFID na etapie produkcji. Zainstalowano tunele RFID w centrach dystrybucyjnych, które automatycznie kontrolują dostawy.

Wdrożenie RFID przyniosło znaczne korzyści, w tym poprawę dostępności towaru o 15%, około 100-krotne skrócenie czasu inwentaryzacji oraz przyspieszenie rejestracji towaru o 70%. Dla MŚP technologia RFID może poprawić zarządzanie zapasami, zwiększyć efektywność operacyjną i podnieść konkurencyjność.

16. Źródło: <https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/technologia-rfid-elektroniczne-metki-w-sieci-reserved/5t5w21k>

3.2. Internet Rzeczy (IoT)

Internet Rzeczy (IoT) to technologia łącząca urządzenia fizyczne z internetem, umożliwiającą przedsiębiorcom zbieranie i wymianę danych. W kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), IoT rewolucjonizuje sposób funkcjonowania przedsiębiorstw poprzez umożliwienie monitorowania operacji w czasie rzeczywistym, efektywniejsze zarządzanie zasobami i wydłużanie cyklu życia produktów.

IoT wspiera zarządzanie skomplikowanymi procesami w ramach GOZ. Dzięki technologii śledzenia materiałów firmy mogą monitorować przepływ surowców

w łańcuchu dostaw oraz lepiej zarządzać logistyką zwrotną. Czujniki w produktach zbierają dane o ich stanie technicznym, co jest kluczowe dla firm zajmujących się recyklingiem lub regeneracją. IoT umożliwia również zdecentralizowaną produkcję, naprawę i modyfikację produktu, redukując konieczność transportu na duże odległości.

Dla MŚP z ograniczonymi zasobami, IoT staje się narzędziem umożliwiającym osiągnięcie większej efektywności operacyjnej przy jednoczesnym spełnianiu wymogów zrównoważonego rozwoju. Technologia ta pozwala przedsiębiorstwom działać bardziej zrównoważenie – minimalizując odpady i maksymalizując wartość pozyskiwaną z każdego produktu czy surowca.

Zarządzanie budynkiem dzięki IoT¹⁷

Velis Real Estate Tech (Polska) tworzy inteligentne systemy zarządzania budynkami. Dzięki opracowanym przez siebie czujnikom IoT możliwe jest monitorowanie zużycia energii czy wody w czasie rzeczywistym oraz automatyczne dostosowywanie parametrów budynku do aktualnych potrzeb użytkowników. Takie rozwiązania nie tylko obniżają koszty operacyjne, ale również wspierają cele zrównoważonego rozwoju poprzez ograniczenie marnotrawstwa zasobów.

W branżach operujących na aktywach o wysokiej wartości, wczesne inwestycje w technologie IoT przyniosły znaczące korzyści. Miliardy czujników wykorzystywane są w sektorach transportu,

produkcji i inżynierii do przewidywania momentu konserwacji predykcyjnej, co wydłuża żywotność maszyn i redukuje marnotrawstwo zasobów.

17. Źródło: <https://www.kpt.krakow.pl/success-stories/globalne-sukcesy-velis-real-estate-tech/>

Internet Rzeczy to „inteligentny krwiobieg” współczesnego biznesu – od urzędów noszonych przez ludzi po zaawansowane systemy przemysłowe. Dla MŚP IoT może stać się kluczowym narzędziem transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Firmy te mogą dzięki niemu zwiększyć swoją innowacyjność, poprawić efektywność operacyjną i spełniać wymagania regulacyjne związane z gospodarką obiegu zamkniętego.

3.3. Zautomatyzowane systemy wizyjne

Zautomatyzowane systemy wizyjne (ang. machine vision) to technologie oparte na obrazowaniu, które umożliwiają inspekcję produktów w procesach produkcyjnych i przemysłowych. Dzięki zastosowaniu inteligentnych kamer oraz zaawansowanego oprogramowania, systemy te są w stanie automatycznie przeprowadzać kontrolę jakości, sortowanie produktów czy monitorowanie procesów produkcyjnych. Współczesne systemy wizyjne wykorzystują zarówno kamery 2D, jak i 3D, umożliwiając bardziej precyzyjną analizę detali.

Typy systemów wizyjnych i ich zastosowania

Istnieje wiele rodzajów systemów wizyjnych, które można dostosować do konkretnych potrzeb przedsiębiorstwa. Wybór odpowiedniego rozwiązania zależy od kilku czynników, takich jak rodzaj inspekcji, specyfika produktów, prędkość linii produkcyjnej oraz budżet.

- **Systemy inspekcji druku i kodów** - umożliwiają identyfikację błędnie oznaczonych lub uszkodzonych etykiet, co ma kluczowe znaczenie dla śledzenia produktów i minimalizacji strat. Pozwalają one na weryfikację czytelności kodów kreskowych i QR, kontrolę jakości nadruków oraz sprawdzanie poprawności informacji na etykietach, takich jak składniki czy daty ważności. Przykładem może być zastosowanie systemu wizyjnego w przemyśle spożywczym, gdzie kamery kontrolują nadruki na etykietach, eliminując produkty z nieczytelnymi lub błędnymi oznaczeniami, co ogranicza ilość odpadów produkcyjnych.
- **Systemy inspekcji wad produktu** - umożliwiają automatyczną detekcję defektów w czasie rzeczywistym, co minimalizuje odpady i zwiększa efektywność produkcji. Dzięki tym technologiom możliwe jest wykrywanie wgnieceń, pęknięć,

uszkodzeń opakowań, a także kontrola poprawnego rozmieszczenia etykiet i zamknięć. Przykładowo, w przemyśle motoryzacyjnym, systemy te

pozwalają na bieżącą kontrolę jakości komponentów, eliminując wadliwe części jeszcze na etapie produkcji.¹⁸

Technologie wizyjne pozwalają ograniczyć marnotrawstwo żywności¹⁹

Firma TOMRA dostarcza urządzenia do sortowania, gotowania na parze i obierania warzyw i owoców. System może również dostarczać informacje na temat stanu żywności i procesów dojrzewania. Technologie firmy wykorzystują czujniki i algorytmy sztucznej inteligencji, aby segregować żywność. Pomagają one przekierowywać produkty nadające się do sprzedaży detalicznej oraz produkty dobrej jakości, które nie są uważane za odpowiednie do bezpośredniej sprzedaży, w celu wykorzystania w procesach przetwórstwa żywności, zapobiegając powstawaniu odpadów.

Inspekcja opakowań i kontrola procesu pakowania - to kolejny obszar, w którym systemy wizyjne przynoszą korzyści. Umożliwiają one weryfikację integralności opakowania, kontrolę kształtu i stanu materiału opakowaniowego oraz automatyczne wykrywanie wad powierzchniowych. Przykładowo, w przemyśle kosmetycznym, technologia ta pomaga wykrywać uszkodzone lub nieszczelne opakowania, co znacząco zmniejsza ilość odpadów i zwiększa bezpieczeństwo produktów.

Systemy inspekcji materiałów i surowców - wspierają wykrywanie wad materiałowych i optymalizację wykorzystania surowców. Umożliwiają one inspekcję powierzchni tkanin, papieru, plastiku czy metalu pod kątem uszkodzeń, automatyczne sortowanie materiałów w procesie recyklingu oraz monitorowanie jakości surowców w czasie rzeczywistym. Przykładowo, w przemyśle tekstylnym zastosowanie systemów wizyjnych pozwala na wykrywanie uszkodzeń materiałów przed ich dalszym przetwarzaniem, co zmniejsza ilość odpadów i poprawia efektywność produkcji.

18. Źródło: <https://space24.pl/przemysl/sektor-krajowy/robotyzacja-to-przyszlosc-przemyslu-polska-musi-przyspieszyc>

19. <https://www.tomra.com/food/media-center/news/2023/a-spotlight-on-ai>

■ **Systemy kontroli procesów produkcyjnych²⁰** - wspierają optymalizację i automatyzację linii produkcyjnych, poprawiając precyzję i zmniejszając ilość odpadów. Wykorzystują dane zwrotne z kamer do precyzyjnego pozycjonowania robotów przemysłowych, monitorowania trendów w danych produkcyjnych oraz rejestrowania zdarzeń i przechowywania danych historycznych dla analizy jakości. Przykładem może być zastosowanie systemów wizyjnych w branży elektronicznej, gdzie monitorują one montaż komponentów, minimalizując ryzyko defektów i błędów montażowych.

Jeśli chodzi o użyteczność zautomatyzowanych systemów wizyjnych, to przynoszą one MŚP szereg korzyści. Automatyczna inspekcja produktów zmniejsza ilość odpadów poprzez eliminację wadliwych wyrobów na wczesnym etapie produkcji, co przekłada się na redukcję strat materiałowych. Precyzyjna kontrola jakości pozwala na spełnianie wysokich standardów produkcyjnych, co zwiększa konkurencyjność na rynku. Automatyzacja procesów kontrolnych zmniejsza również koszty operacyjne, ograniczając potrzebę zatrudniania dodatkowego personelu.

Optymalizacja produkcji rolniczej dzięki systemom wizyjnym²⁰

Firmy takie jak FARMWAVE, Taranis i Aerobotics wykorzystują sztuczną inteligencję do interpretowania zdjęć upraw ze smartfonów, satelitów i dronów, aby jak najwcześniej wykrywać oznaki szkodników i chorób, dzięki czemu rolnicy mogą precyzyjnie interweniować i zmniejszyć straty w uprawach. Istnieje również możliwość monitorowania wilgotności gleby i cyklu wegetatywnego w celu planowania prac rolniczych, a także optymalizacji wykorzystania nawozów.

20. Źródło: https://www.elmark.com.pl/blog/systemy-wizyjne-dla-cobotw--wszystko-co-powinienes-wiedziec?srsId=AfmBOor_F0Gtxq0VrTQjOHO-swPI93jArdb5T75a_ZpPAol_aH5QZh9j

3.4. Blockchain

Blockchain nie jest tak skomplikowany, jak mogłoby się wydawać. W uproszczeniu jest to rozproszony rejestr, który eliminuje konieczność angażowania zaufanej trzeciej strony do audytowania transakcji. Technologia ta przechowuje informacje o transakcjach w czasie rzeczywistym w „blokach”, które są kryptograficznie powiązane, tworząc niezmienny zapis aktywności.

W kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), blockchain może wspierać dwa kluczowe obszary: weryfikację pochodzenia produktów oraz zachęcanie do pozytywnych zmian w zachowaniach konsumenckich i biznesowych.

Pewność na temat źródła dostaw²¹

Przykładem zastosowania tej technologii jest start-up Provenance, który przetestował blockchain w branży rybołówstwa, śledząc pochodzenie tuńczyka od momentu połowu aż do sprzedaży w sklepie, jednocześnie potwierdzając społeczne i środowiskowe standardy jego połowu.

Motywowanie do proekologicznych zachowań dzięki blockchain

Blockchain umożliwia tokenizację zasobów naturalnych, nadając im unikalne cyfrowe tożsamości (podobne do cyfrowych monet), którymi można handlować. To sprawia, że wartość zasobów staje

Weryfikacja pochodzenia produktów dzięki blockchain

Gospodarka cyrkularna promuje zrównoważone zarządzanie zasobami, redukcję odpadów oraz ponowne wykorzystanie i recykling surowców. Aby skutecznie wdrożyć te praktyki, konieczna jest transparentność, która buduje zaufanie do kupowanych produktów i ich pochodzenia. Większa przejrzystość w łańcuchach dostaw może wymusić na firmach zmianę sposobu pozyskiwania surowców i procesów produkcyjnych. Blockchain stanowi fundament dla budowy cyfrowych, transparentnych łańcuchów dostaw, oferując niezmienny zapis transakcji, który potwierdza pochodzenie produktów.

się bardziej namacalna, tworząc nowe systemy wyceny i wymiany surowców oraz zachęcając do ich cyrkularnego wykorzystania. Branża recyklingu już testuje takie rozwiązania – Plastic Bank opracował system, w którym osoby zbierające plastikowe odpady otrzymują za nie cyfrowe tokeny, które mogą wymieniać na towary w partnerskich sklepach.

Ograniczenia blockchain

Blockchain przechowuje dane pochodzące np. z urządzeń IoT lub tagów RFID. To powiązanie z rzeczywistością fizyczną stwarza wyzwania, zwłaszcza w zakresie jakości danych – jeśli wprowadzane informacje są błędne, wyniki również będą niewiarygodne. Ponadto ograniczona skalowalność i brak interoperacyjności z istniejącymi systemami budzą wątpliwości co do realnych możliwości wdrożenia tej technologii na szeroką skalę. Dlatego wiele projektów nadal znajduje się w fazie pilotażowej.

Blockchain oferuje MŚP nowe możliwości w zakresie poprawy transparentności łańcuchów dostaw, lepszego zarządzania zasobami i motywowania do cyrkularnych praktyk. Choć technologia ta nadal napotyka wyzwania związane z integracją i skalowalnością, jej potencjał w gospodarce o obiegu zamkniętym jest ogromny. W miarę jak rozwijają się nowe rozwiązania, blockchain może stać się kluczowym narzędziem wspierającym zrównoważony rozwój małych i średnich przedsiębiorstw.

Identyfikowalność produktów w łańcuchach dostaw dzięki blockchain²²

W Indonezji firma Unilever wykorzystała technologie blockchain do pozyskania ponad 188 000 ton owoców palmy olejowej. Rozwiązanie umożliwiło dostawcom, stworzenie tokenów, które odzwierciedlają przepływ materiałów oleju palmowego w całym łańcuchu dostaw i rejestrują unikalne atrybuty związane z pochodzeniem oleju.

3.5. Cyfrowe bliźniaki i paszporty produktów

Wdrożenie technologii cyfrowych, takich jak cyfrowe bliźniaki i paszporty produktowe, pozwala na precyzyjne zarządzanie produktami w całym ich cyklu życia.

Cyfrowe bliźniaki jako narzędzie optymalizacji

Cyfrowy bliźniak to wirtualna reprezentacja obiektu lub systemu, która obejmuje cały cykl jego życia. Jest aktualizowana na podstawie danych w czasie rzeczywistym i wykorzystuje symulację, uczenie maszynowe oraz rozumowanie do wspomaganie podejmowania decyzji²².

21. Źródło: <https://www.unilever.com/news/press-and-media/press-releases/2022/sap-unilever-pilot-blockchain-technology-supporting-deforestation-free-palm-oil/>

22. Źródło: Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer, Cham.

Dzięki korzystaniu z tego narzędzia MŚP mogą:

- Monitorować stan i zużycie produktu w czasie rzeczywistym, co pozwala na optymalizację utrzymania ruchu i wydłużenie czasu użytkowania.
- Identyfikować możliwości naprawy lub regeneracji, co redukuje konieczność produkcji nowych komponentów i obniża koszty.
- Analizować ślad materiałowy i wyznaczać najlepsze ścieżki ponownego wykorzystania surowców.

Dla MŚP, które często operują na ograniczonych zasobach, cyfrowe bliźniaki mogą zoptymalizować procesy i obniżyć koszty operacyjne. Przykładem może być użycie cyfrowych bliźniaków do monitorowania stanu maszyn produkcyjnych, co pozwala na prognozowanie awarii i unikanie kosztownych przestojów.

Cyfrowe paszporty produktowe - rzetelne świadectwo informacji na temat produktów

Paszporty produktowe (Digital Product Passport, DPP) to systemy przechowujące informacje o danym produkcie przez cały jego cykl życia. W kontekście GOZ, DPP mogą zrewolucjonizować zarządzanie zasobami, ponieważ umożliwiają:

- Śledzenie składu i pochodzenia surowców, co ułatwia recykling i ponowne wykorzystanie komponentów.
- Poprawę przejrzystości w łańcuchach dostaw, co pomaga MŚP w weryfikacji zgodności z regulacjami ekologicznymi i certyfikacjami.
- Wsparcie dla konsumentów poprzez dostarczanie im informacji o możliwościach naprawy i recyklingu zakupionych produktów.

Od 2026 roku Cyfrowy Paszport Produktu (DPP) stanie się obowiązkowym wymogiem dla przedsiębiorstw wprowadzających produkty na rynek UE, zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie ekologicznego wzornictwa dla zrównoważonych produktów (ESPR).

Dla małych i średnich przedsiębiorstw najważniejsze korzyści wynikające z wdrożenia cyfrowych bliźniaków i paszportów produktowych to:

1. **Oszczędności** – optymalizacja procesów produkcyjnych i zmniejszenie zużycia surowców obniża koszty.
2. **Lepsze zarządzanie odpadami** – identyfikacja możliwości ponownego wykorzystania i recyklingu surowców.
3. **Zgodność z regulacjami** – ułatwienie raportowania i dostosowania do wymagań legislacyjnych UE.

4. Poprawa relacji z klientami –

dostarczanie informacji o produktach i ich śladzie ekologicznym może być przewagą konkurencyjną.

Śledzenie materiałów dzięki cyfrowemu paszportowi baterii²⁴

Globalny sojusz na rzecz baterii (ang. Global Battery Alliance, GBA) wdraża cyfrowy paszport baterii. Paszporty baterii zawierają informacje dotyczące środowiska, odpowiedzialności społecznej i ładu korporacyjnego (ESG), w tym częściowe raportowanie śladu węglowego, lokalizacje pozyskiwania materiałów i przestrzegania praw człowieka. Na przykład paszport był w stanie prześledzić drogę 100% kobaltu używanego w akumulatorach Tesli od kopalni, w której go wydobyto. W rezultacie zwiększono przejrzystość łańcucha dostaw, zmniejszono wpływ na środowisko i zwiększono zaufanie konsumentów.

3.6. Chmury obliczeniowe i platformy internetowe

Chmura obliczeniowa (ang. cloud computing) to model dostarczania usług informatycznych, takich jak przechowywanie danych, przetwarzanie czy analiza, za pośrednictwem Internetu. Dzięki tej technologii użytkownicy mogą korzystać z zasobów komputerowych na żądanie, bez konieczności posiadania własnej infrastruktury IT. Dane i aplikacje są przechowywane na serwerach dostawców

usług chmurowych, co umożliwia łatwy dostęp z dowolnego miejsca i urządzenia²⁴.

Chmura obliczeniowa wspiera MŚP w transformacji cyrkularnej poprzez:

- **Optymalizację zarządzania zasobami:** chmura umożliwia firmom monitorowanie cyklu życia produktów, od projektowania po utylizację, co sprzyja lepszemu planowaniu i redukcji marnotrawstwa.
- **Zarządzanie danymi w czasie rzeczywistym:** dzięki chmurze MŚP mogą analizować dane na bieżąco, identyfikować obszary generujące odpady i podejmować szybkie działania

23. Źródło: <https://www.globalbattery.org/battery-passport-poc-pilots/>

24. Źródło: National Institute of Standards and Technology (NIST) <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf>

korygujące, co pozwala ograniczać negatywny wpływ na środowisko.

■ **Elastyczność i skalowalność:**

rozwiązania chmurowe pozwalają MŚP na elastyczne dostosowywanie zasobów do aktualnych potrzeb, minimalizując nadprodukcję i marnotrawstwo surowców.

■ **Zrównoważone łańcuchy dostaw:**

chmura umożliwia lepszą współpracę z partnerami biznesowymi, co przekłada się na bardziej efektywne i zrównoważone zarządzanie zasobami w całym łańcuchu dostaw.

■ **Zmniejszenie śladu węglowego:**

przechowywanie i przetwarzanie danych w chmurze, zamiast w lokalnych serwerowniach, często przyczynia się do zmniejszenia zużycia energii i emisji CO₂, co wspiera cele transformacji cyrkularnej.

Technologia chmurowa oferuje MŚP narzędzia, które nie tylko zwiększają efektywność operacyjną, ale również wspierają realizację celów zrównoważonego rozwoju, minimalizując wpływ działalności gospodarczej na środowisko.

Platformy cyfrowe mogą służyć jako rynki, na których przedsiębiorstwa mogą handlować produktami i materiałami wtórnymi. Dzięki tym platformom MŚP mogą łatwiej znaleźć nabywców dla swoich

produktów i materiałów, co zwiększa efektywność gospodarczą i ekologiczną²⁵.

Zalety Platform Cyfrowych dla MŚP:

■ **Redukcja kosztów transakcyjnych:**

platformy cyfrowe ułatwiają znalezienie partnerów handlowych, co zmniejsza koszty poszukiwania i negocjacji.

■ **Zwiększona przejrzystość:** dostęp do informacji o jakości i dostępności materiałów wtórnych pomaga w podejmowaniu lepszych decyzji biznesowych.

■ **Innowacyjne modele**

biznesowe: platformy umożliwiają rozwój nowych modeli biznesowych opartych na współpracy i wymianie informacji.

Platformy cyfrowe oferują potencjał korzyści, jednak aby były one w pełni wykorzystane, konieczne jest pokonanie wyzwań związanych z gotowością cyfrową, bezpieczeństwem danych i regulacjami. Wsparcie instytucjonalne i finansowe może odegrać kluczową rolę w tym procesie.

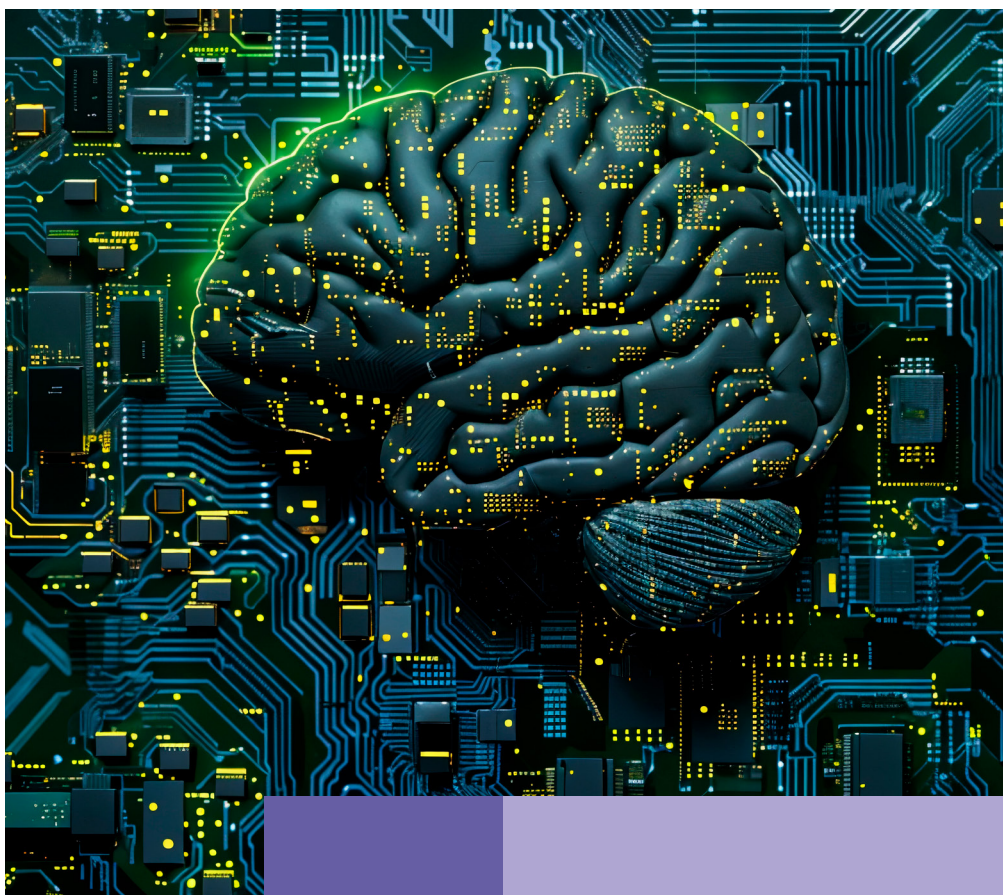
25. Źródło: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7103/file/7103_Berg.pdf

Ograniczenie marnotrawstwa leków dzięki platformie wymiany²⁷

Około 700 aptek w Holandii, korzysta obecnie z systemu ograniczającego marnotrawstwo leków. Dotychczas leki, które były zamawiane dla konkretnego pacjenta, ale nie zostały odebrane pozostawały zwykle na półkach do czasu przeterminowania. Platforma PharmaSwap została założona, aby temu zapobiec. Farmaceuci mogą dzielić się nadmiarem leków na receptę z podmiotem, który ma pacjenta potrzebującego dokładnie tego leku. Hurtownie mogą również udostępniać na platformie zapasy leków, których termin przydatności jest krótki. PharmaSwap przyczynia się do oszczędności kosztów w opiece zdrowotnej, jednocześnie ograniczając marnotrawstwo zasobów.



26. Źródło: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7103/file/7103_Berg.pdf



4. Maszynowe technologie przetwarzania danych w wiedzę

Rozwój technologii informatycznych przyczynia się do dynamicznego wzrostu ilości danych cyfrowych. Dane te opisują otaczającą nas rzeczywistość, a zawarte w nich informacje mają ogromną wartość. Ze względu na ich skalę oraz tempo gromadzenia, do ich analizy niezbędne jest wykorzystanie zaawansowanych systemów komputerowych. Takie podejście stosują nie tylko ośrodki naukowe, ale także firmy z różnych sektorów – od finansowego i publicznego, przez produkcyjny, aż po handel.

Pozyskane dane mogą być przekształcane w wiedzę, która następnie wspiera procesy decyzyjne i działania biznesowe. Tradycyjnie to ludzie odpowiadali za interpretację danych i formułowanie wniosków. Obecnie jednak coraz większą rolę odgrywają technologie oparte na sztucznej inteligencji i uczeniu maszynowym, które automatyzują te procesy, zastępując człowieka w analizie i wyciąganiu wniosków.

4.1. Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe

Sztuczna inteligencja (AI) i uczenie maszynowe (ML) to jedno z najważniejszych technologii współczesnego świata, które rewolucjonizują sposób, w jaki ludzie przetwarzają informacje, podejmują decyzje i rozwiązują złożone problemy. Dzięki algorytmom uczącym się na podstawie danych możliwe jest tworzenie systemów zdolnych do rozpoznawania wzorców, przewidywania zdarzeń oraz automatyzacji wielu procesów w różnych dziedzinach – od medycyny i przemysłu po finanse i marketing.

Rozwój sztucznej inteligencji opiera się na modelach matematycznych, statystyce oraz ogromnych zbiorach danych, które pozwalają komputerom samodzielnie poprawiać swoje działanie bez konieczności bezpośredniego programowania każdej decyzji.

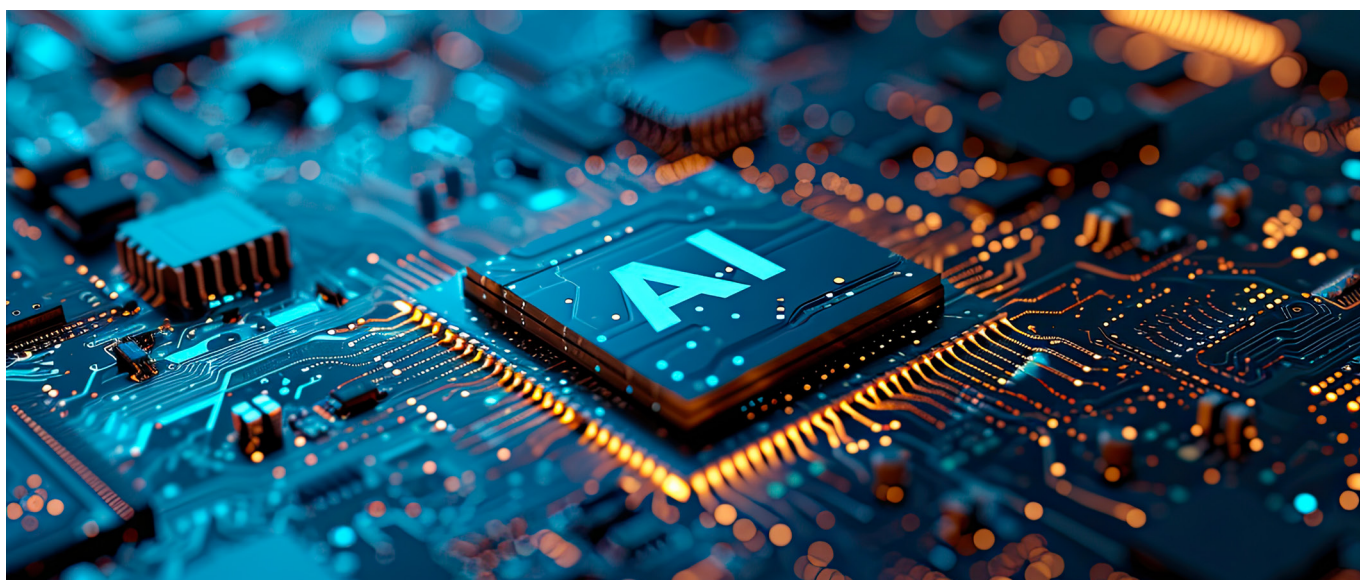
Wraz z cyfryzacją gromadzenia danych, pojawia się potrzeba cyfryzacji procesu pozyskiwania wiedzy. Sztuczna inteligencja może być wykorzystywana do przetwarzania danych i formułowania wniosków o praktycznym zastosowaniu, wspierając tym samym transformację w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ).

Kluczowe techniki AI wykorzystywane do wspierania cyrkularności to:

- **Uczenie maszynowe**, które zapewnia komputerom zdolność do nauki na podstawie danych, analizy i wyciągania wniosków złożonych wzorców danych oraz dokonywania prognoz przy minimalnej ingerencji człowieka, m.in. poprzez wykorzystanie wzorów statystycznych i algorytmów uczących się.
- **Sztuczne sieci neuronowe**, które naśladują sposób funkcjonowania komórek nerwowych w ludzkim mózgu i stosują algorytmy uczące się, które mogą samodzielnie dostosowywać się do nowych danych, rozwiązując złożone problemy.
- **Konwolucyjne sieci neuronowe** to klasa sieci neuronowych wyposażonych w zaawansowane funkcje przetwarzania obrazu cyfrowego, często stosowane do analizy wizualnej.

- **Analiza szeregów czasowych** to technika pozwalająca na pracę ze zmiennymi ewoluującymi w czasie. Jest bardzo skuteczna w identyfikacji trendów w danych historycznych i przewidywaniu przyszłych zdarzeń. Metody obejmują m.in. linie trendu, autokorelację, średnią ruchomą oraz zaawansowane modele głębokiego uczenia, takie jak Long Short-Term Memory (LSTM).

Dzięki zdolności do szybkiej interpretacji dużych ilości złożonych danych i dostarczania prostych, przejrzystych informacji zwrotnych, sztuczna inteligencja może wspierać innowacje w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym w różnych sektorach. AI może pełnić rolę technologii wspomagającej gospodarkę cyrkularną na każdym etapie cyklu życia produktu.



Ryc. 3 Wybrane zastosowania sztucznej inteligencji na poszczególnych etapach cyklu życia produktu.

Zaopatrzenie w zasoby	• AI analizuje dane o dostępnych surowcach, ich pochodzeniu i składzie, pomagając w wyborze zrównoważonych materiałów. • Systemy predykcyjne mogą prognozować zapotrzebowanie na surowce i minimalizować odpady poprzez optymalne planowanie dostaw.
Produkcja	• AI monitoruje procesy produkcyjne w czasie rzeczywistym, wykrywając wady produktów i zwiększając efektywność. • Sztuczna inteligencja wspiera automatyzację i robotyzację, co redukuje zużycie surowców oraz emisję CO₂. • Algorytmy optymalizują zużycie energii w fabrykach, zmniejszając ślad węglowy.
Dystrybucja	• AI optymalizuje logistykę i łańcuchy dostaw, przewidując najbardziej efektywne trasy transportowe i ograniczając koszty paliwa. • Systemy śledzenia i analizy danych umożliwiają inteligentne zarządzanie zapasami oraz przewidywanie popytu.
Użytkowanie	• AI umożliwia predykcyjną konserwację produktów, wydłużając ich żywotność i zmniejszając potrzebę częstej wymiany. • Inteligentne systemy analizują sposób użytkowania produktów, sugerując bardziej efektywne metody eksploatacji. • AI wspiera modele gospodarki współdzielenia (np. car-sharing), optymalizując dostępność i wykorzystanie zasobów.
Zagospodarowanie odpadów	• Algorytmy rozpoznawania obrazu pomagają w sortowaniu odpadów i identyfikacji surowców nadających się do recyklingu. • AI analizuje skład produktów i ich możliwości demontażu, ułatwiając procesy odzysku materiałów. • Inteligentne systemy przewidują najlepsze metody utylizacji odpadów, maksymalizując ponowne wykorzystanie surowców.

Źródło: Opracowanie własne.

Sztuczna inteligencja i, szerzej, technologie cyfrowe pozwalają dążyć do większej efektywności ekologicznej. Geolokalizacja, wirtualizacja, dematerializacja oraz transparentność przepływu produktów i materiałów to technologie cyfrowe, które – w połączeniu z AI – mogą umożliwić wdrażanie modeli gospodarki cyrkularnej.

Praktycznym przykładem jest instalacja specjalnych czujników w budynkach, które zbierają ogromne ilości danych i są połączone z oprogramowaniem wykorzystującym algorytmy sztucznej inteligencji. Takie oprogramowanie może reagować w czasie rzeczywistym na zmiany operacyjne i środowiskowe, optymalizując zarządzanie energią i jej efektywność, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia zużycia i zwiększenia korzyści środowiskowych oraz ekonomicznych.

W sektorze mobilności wykorzystanie informacji geoprzestrzennych interpretowanych przez AI pozwala na większą przejrzystość przepływu ludzi i materiałów w miastach. Oprogramowanie analizuje dane i sugeruje optymalne modele tras, co skutkuje zmniejszeniem ruchu drogowego i redukcją związanych z nim emisji zanieczyszczeń.

Ponadto AI, dzięki zdolności monitorowania i interpretacji danych w czasie rzeczywistym, umożliwia rozwój modeli współdzielenia produktów i dóbr, takich jak samochody, hulajnogi elektryczne, rowery i wiele innych, co dodatkowo przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania zasobów.

Optymalizacja odsprzedaży mebli dzięki sztucznej inteligencji²⁷

15 procent zwracanych produktów IKEA staje się odpadami. Aby temu zaradzić, firma zastosowała sztuczną inteligencję do obsługi zwróconych towarów. Zainstalowała platformę AI opracowaną przez swojego partnera w 50 lokalizacjach w całych Stanach Zjednoczonych. Przewiduje ona najlepsze możliwe miejsce docelowe dla zwróconych towarów – powrót na półki sklepowe, do hurtowni sklepu internetowego, przekazanie na cele charytatywne, czy sprzedaż do zewnętrznej hurtowni.

27. Źródło: <https://www.fastcompany.com/90471230/to-slash-waste-ikea-looks-to-artificial-intelligence>

4.2. Big data

Big data odnosi się do ogromnych zbiorów danych, które mogą być analizowane w celu odkrycia ukrytych wzorców, trendów i zależności. W połączeniu z algorytmami uczenia maszynowego umożliwia automatyczne wyciąganie wniosków i podejmowanie decyzji w oparciu o dane. Wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego do analizy dużych zbiorów danych jest logicznym krokiem dla firm, które dążą do maksymalnego wykorzystania potencjału big data. Systemy uczenia maszynowego stosują algorytmy oparte na danych oraz modele statystyczne do analizy i identyfikacji wzorców w danych. Różni się to od tradycyjnych podejść opartych na regułach, które działają według ściśle określonych instrukcji. Coraz więcej organizacji dostrzega korzyści płynące z połączenia big data i uczenia maszynowego.

Gospodarka o obiegu zamkniętym jest obecnie szeroko dyskutowanym zagadnieniem zarówno w środowisku akademickim, jak i w przemyśle, szczególnie w kontekście rosnącego zagrożenia niedoborem globalnych zasobów naturalnych oraz ograniczonych możliwości finansowych małych i średnich przedsiębiorstw na całym świecie. Wraz z piątą rewolucją przemysłową, określaną jako Industry 5.0, na pierwszy plan wysuwają się kwestie związane ze zrównoważonym rozwojem, koncentracją

na człowieku oraz odpornością systemów. Dlatego oczywiste jest, że gospodarka o obiegu zamkniętym odgrywa kluczową rolę w ramach Industry 5.0., umożliwiając dokładne monitorowanie przepływu surowców i produktów, a także optymalizację procesów produkcyjnych w czasie rzeczywistym. Zaawansowana analiza danych pozwala na identyfikację wzorców konsumpcji oraz przewidywanie zapotrzebowania, co ułatwia minimalizowanie odpadów i bardziej efektywne wykorzystanie zasobów. Ponadto, dzięki big data możliwe jest skuteczniejsze projektowanie modeli biznesowych opartych na ekonomii cyrkularnej, co sprzyja zwiększeniu konkurencyjności firm i ich długoterminowej stabilności. Ze względu na wykorzystanie sztucznej inteligencji i nowoczesnych technologii kluczowe jest zrozumienie, jak skutecznie stosować analitykę big data, aby maksymalnie wykorzystać potencjał gospodarki o obiegu zamkniętym²⁸.

Analityka big data jako część technologii cyfrowych jest rozwijającą się dziedziną. Dotychczas przeprowadzono niewiele badań i opracowań dotyczących tego, jak big data może być stosowane do pełnego wykorzystania strategii cyrkularnych w celu poprawy efektywności zasobów i produktywności. Skuteczne zarządzanie zasobami w inicjatywach big data staje się coraz bardziej istotne dla organizacji.

28. Weerasinghe, T., Beta, K., & Nagaraj, S. S. (2023). *Effective usage of Big Data analytics in Circular Economy*. IEEE ICTMOD Conference - 2023.

Big data ograniczające zużycie energii³⁰

Jednym z przykładów firmy wykorzystującej big data w gospodarce cyrkularnej jest Orange Polska. Firma ta wdraża zasady gospodarki obiegu zamkniętego, dążąc do minimalizacji emisji zanieczyszczeń i marnotrawstwa zasobów, co przyczynia się do przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Wykorzystanie technologii, w tym analizy dużych zbiorów danych, pozwala Orange na efektywne zarządzanie zasobami oraz optymalizację procesów produkcyjnych i usługowych.

Przykładem takiego działania jest monitorowanie i analiza danych dotyczących zużycia energii w sieciach telekomunikacyjnych, co pozwala na identyfikację obszarów wymagających optymalizacji pod względem efektywności energetycznej. Dzięki temu Orange może wdrażać innowacyjne rozwiązania ograniczające zużycie energii i emisję CO₂, przyczyniając się do realizacji założeń gospodarki cyrkularnej.

Kluczowe aspekty wykorzystania analityki big data w gospodarce o obiegu zamkniętym

Na podstawie badań zidentyfikowano kilka kluczowych czynników, dzięki którym analityka big data pomaga w optymalizacji zarządzania zasobami w gospodarce cyrkularnej:

■ śledzenie produktów i materiałów

- dzięki technologii IoT i systemom identyfikacji, takim jak RFID czy blockchain, firmy mogą gromadzić i analizować dane przy użyciu technologii big data, monitorując cykl życia produktów i materiałów w czasie rzeczywistym. Informacje te pozwalają na skuteczniejsze zarządzanie

- przepływem zasobów, a także ułatwiają recykling i ponowne wykorzystanie komponentów;

■ **udostępnianie danych** – platformy oparte na big data umożliwiają lepszą koordynację działań i tworzenie zamkniętych pętli surowcowych;

■ zamawianie części zamiennych

- inteligentne systemy oparte na analizie big data umożliwiają prognozowanie zużycia komponentów oraz ich automatyczne zamawianie. W rezultacie przedsiębiorstwa mogą uniknąć nadmiernego magazynowania części oraz minimalizować odpady wynikające z nieefektywnego zarządzania zasobami;

29. Źródło: https://www.orange.pl/poradnik-dla-firm/firma-online/gospodarka-cyrkularna-czym-jest/?utm_source=chatgpt.com

■ **optymalne wykorzystanie zasobów**, poprzez: redukcję przestojów w produkcji, zamawianie części zamiennych, przewidywanie kondycji i zużycia produktów, planowanie konserwacji, poprawę efektywności energetycznej.

Wykorzystanie big data w gospodarce o obiegu zamkniętym pozwala na znaczną poprawę efektywności zarządzania zasobami, redukcję strat i lepsze dopasowanie podaży do popytu. Dzięki nowoczesnym technologiom możliwe jest nie tylko minimalizowanie negatywnego wpływu działalności przemysłowej na środowisko, ale także zwiększenie konkurencyjności przedsiębiorstw poprzez bardziej zrównoważone i optymalne zarządzanie procesami produkcyjnymi.

4.3. Technologie predykcyjne

W czasach, gdy odpowiedzialne zarządzanie zasobami nie jest już wyborem, lecz koniecznością, koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym stała się centralnym elementem strategii biznesowych i oczekiwań społecznych. Gospodarka cyrkularna dąży do minimalizacji odpadów i maksymalizacji wykorzystania zasobów, promując systemy, w których materiały pozostają w użyciu tak długo, jak to możliwe. W tym kontekście predykcyjne utrzymanie ruchu wyróżnia się nie tylko jako zaawansowana technologia, ale jako

kluczowy czynnik wspierający GOZ. Zmienia ono tradycyjny model reakcyjnych napraw na proaktywne działania, wydłużając żywotność aktywów i komponentów w sposób, który bezpośrednio wspiera zasady cyrkularności.

Predykcyjne utrzymanie ruchu umożliwia przewidywanie awarii i podejmowanie działań zapobiegawczych, zanim dojdzie do uszkodzeń. To rozwiązanie jest korzystne dla gospodarki cyrkularnej, ponieważ wydłuża czas eksploatacji maszyn i ich części, zmniejszając ilość odpadów i wspierając bardziej zrównoważony rozwój.

Rola danych w predykcyjnym utrzymaniu ruchu

Dane pochodzące z czujników i systemów umożliwiają tworzenie predykcyjnych modeli, które pozwalają na przeprowadzanie konserwacji w odpowiednim momencie. Predykcyjne utrzymanie ruchu wykorzystuje analitykę danych, uczenie maszynowe oraz technologie sensorowe do monitorowania stanu technicznego urządzeń i przewidywania konieczności przeprowadzenia konserwacji. Jest to odejście od tradycyjnych harmonogramów serwisowych opartych na czasie użytkowania, które często prowadzą do przedwczesnych wymian komponentów lub awarii spowodowanych zaniedbaniem.

Dzięki precyzyjnemu prognozowaniu potencjalnych usterek predykcyjne utrzymanie ruchu umożliwia interwencję

tylko wtedy, gdy jest to rzeczywiście konieczne, co optymalizuje wykorzystanie zasobów i minimalizuje przestoje.

Aby w pełni wykorzystać potencjał predykcyjnego utrzymania ruchu w gospodarce cyrkularnej, konieczne jest jego strategiczne zintegrowanie na poziomie całych łańcuchów wartości, a nie tylko w poszczególnych organizacjach. Wdrażanie tej technologii nie może ograniczać się do pojedynczych działów technicznych – musi obejmować cały proces, od pozyskiwania surowców po zarządzanie końcem cyklu życia produktu. Predykcyjne utrzymanie ruchu to nie tylko technika konserwacji, ale strategiczne narzędzie do systemowych zmian w kierunku cyrkularności.

Zasady projektowania cyrkularnego koncentrują się na tworzeniu produktów,

które są trwałe, naprawialne, ponownie wykorzystywane i nadające się do recyklingu. Dane z systemów predykcyjnego utrzymania ruchu dostarczają cennych informacji zwrotnych, które pomagają ulepszać procesy projektowe w duchu gospodarki o obiegu zamkniętym.

Dane gromadzone przez czujniki i systemy konserwacyjne mogą ujawniać wzorce awarii komponentów, identyfikować słabe punkty konstrukcyjne oraz wskazywać obszary, w których można poprawić trwałość produktów. Dzięki takiemu cyklowi informacji zwrotnych przedsiębiorcy mogą iteracyjnie ulepszać swoje rozwiązania, zwiększając ich trwałość i ułatwiając konserwację, co bezpośrednio wspiera cyrkularność już na etapie projektowania produktu.

Predykcyjne prognozowanie awarii maszyn ograniczające przestoje³⁰

Toyota wdrożyła zaawansowany system predykcyjnego utrzymania ruchu, wykorzystujący technologie IoT i sztucznej inteligencji, aby monitorować stan maszyn w czasie rzeczywistym i przewidywać potencjalne awarie. Dzięki temu firma może planować konserwację w sposób proaktywny, minimalizując nieplanowane przestoje i optymalizując efektywność operacyjną.

Współpracując z Amazon Web Services (AWS), Toyota Motor North America zaimplementowała system, który zbiera dane z czujników zamontowanych na urządzeniach produkcyjnych. Analiza tych danych pozwala na wczesne wykrywanie anomalii w pracy maszyn, co umożliwia szybką interwencję serwisową przed wystąpieniem poważniejszych problemów³¹.

30. Źródło: <https://pressroom.toyota.com/toyota-and-generative-ai-its-here-and-this-is-how-were-using-it/>

31. Źródło: <https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/innovators/toyota/>

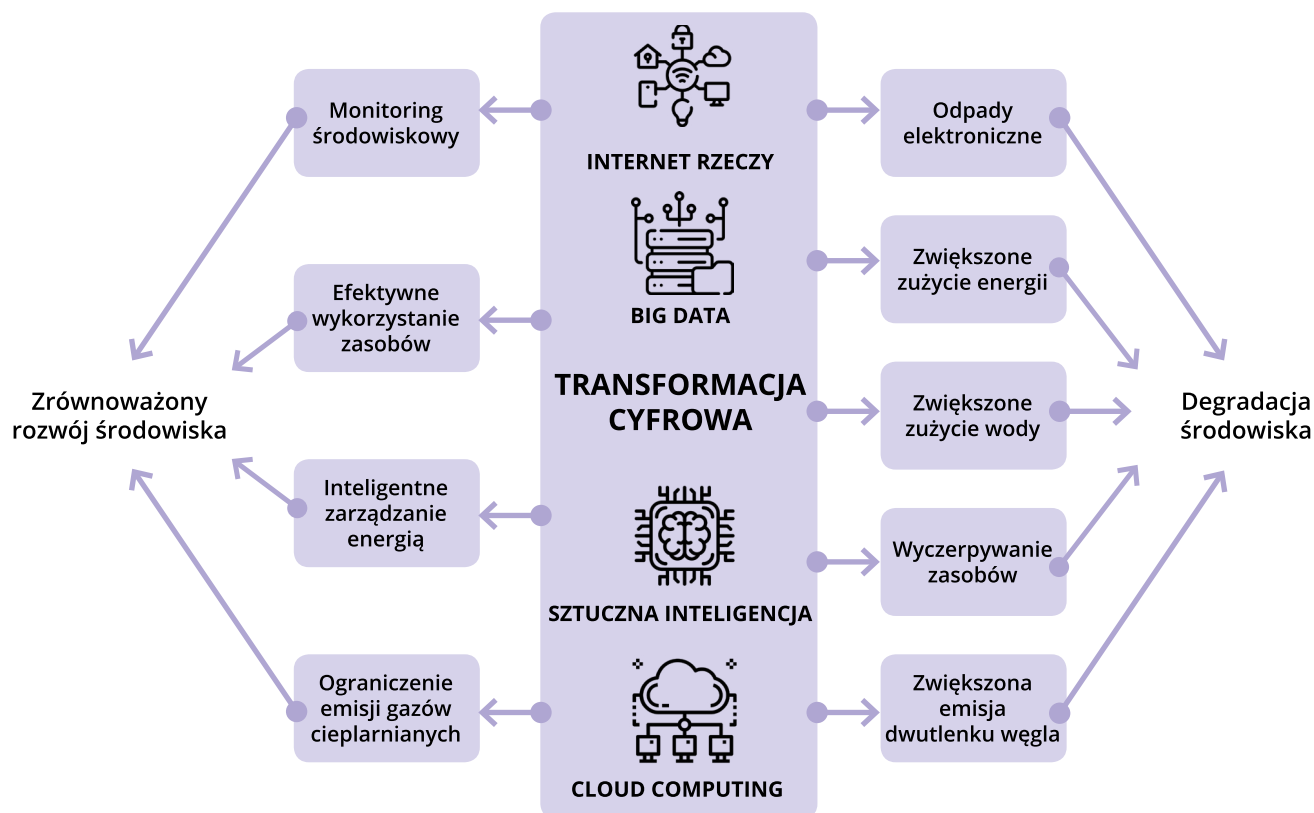


5. Potrzeba minimalizacji efektów zewnętrznych cyfryzacji gospodarki

Choć technologie informacyjne są nieodzownym elementem zamykania obiegów gospodarczych, ich dynamiczny rozwój w ostatnich latach oraz często niezrównoważone podejście do ich wdrażania wiążą się z licznymi efektami zewnętrznymi. Prognozy wskazują, że liczba urządzeń Internetu rzeczy na świecie wzrośnie niemal dwukrotnie – z 15,9 miliarda w 2023 roku do ponad 32,1 miliarda w 2030 roku³². Znaczący wzrost technologii cyfrowych pociągnie za sobą większe zużycie energii, co dodatkowo nasili problemy związane z emisją gazów cieplarnianych, przyczyni się do intensyfikacji wydobycia surowców oraz zwiększy produkcję odpadów elektronicznych.

Podwójny charakter wpływu technologii cyfrowych – wspierających zrównoważony rozwój z jednej strony, a generujących nowe obciążenia środowiskowe z drugiej – podkreśla konieczność zintegrowanego i odpowiedzialnego podejścia do transformacji cyfrowej. Takie podejście obejmuje stosowanie energooszczędnych technologii, integrację odnawialnych źródeł energii oraz konsekwentne wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze technologii informacyjnych. Tylko w ten sposób cyfryzacja może realnie wspierać transformację w kierunku bardziej zrównoważonej i odpornej gospodarki, zamiast pogłębiać istniejące problemy środowiskowe.

Ryc. 4 Zależności między transformacją cyfrową a zrównoważonym rozwojem środowiska



Źródło: Goel, A., Masurkar, S., & Pathade, G. R. (2024). An Overview of Digital Transformation and Environmental Sustainability: Threats, Opportunities, and Solutions. *Sustainability*, 16(24), 11079. <https://doi.org/10.3390/su162411079>

32. Goel, A., Masurkar, S., & Pathade, G. R. (2024). An Overview of Digital Transformation and Environmental Sustainability: Threats, Opportunities, and Solutions. *Sustainability*, 16(24), 11079. <https://doi.org/10.3390/su162411079>

5.1. Zapotrzebowanie na energię

Rozwój technologii cyfrowych przyczynia się do dynamicznego wzrostu zużycia energii elektrycznej, często pochodzącej z nieodnawialnych źródeł, co bezpośrednio przekłada się na zwiększoną emisję gazów cieplarnianych. Do najbardziej energochłonnych technologii informacyjnych należą centra danych, sieci telekomunikacyjne oraz urządzenia elektroniczne, takie jak komputery, serwery, smartfony i urządzenia Internetu rzeczy (IoT). Według danych Międzynarodowej Agencji Energii (IEA), w 2022 roku centra danych oraz sieci transmisji danych odpowiadały za około 1,4-1,7% globalnego zużycia energii elektrycznej³³. Szacuje się, że do końca 2026 roku zapotrzebowanie to może się podwoić, głównie w wyniku rosnącego wykorzystania modeli generatywnej sztucznej inteligencji oraz przetwarzania ogromnych ilości danych w czasie rzeczywistym. Energia potrzebna do zasilania i chłodzenia tych obiektów, w których przechowywane są dziesiątki milionów serwerów, jest ogromna. Szacuje się, że standardowe centrum danych może zużywać tyle energii, co około 25 000

gospodarstw domowych, a powierzchnie centrów danych mogą potrzebować od 100 do 200 razy więcej energii niż typowe biura³⁴.

Zapotrzebowanie na gromadzenie i przetwarzanie danych stale rośnie, a wdrażanie nowoczesnych technologii staje się nieuniknione. W związku z tym kluczowe jest promowanie zrównoważonych alternatyw wykorzystujących energooszczędny sprzęt oraz stosujących odnawialne źródła energii w celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenia efektywności energetycznej.

5.2. Zapotrzebowanie na materiały krytyczne

Cyfryzacja gospodarki wiąże się ze wzrostem popytu na materiały krytyczne, które są niezbędne do produkcji zaawansowanej elektroniki oraz infrastruktury technologii informacyjnej. Europejska Komisja w raporcie z 2023 r. zidentyfikowała 34 surowce jako krytyczne dla gospodarki UE, z czego wiele znajduje bezpośrednie zastosowanie w sektorze ICT³⁵. Należą do

33. Źródło: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>

34. Liu, Y.; Wei, X.; Xiao, J.; Liu, Z.; Xu, Y.; Tian, Y. Energy Consumption and Emission Mitigation Prediction Based on Data Center Traffic and PUE for Global Data Centers. *Glob. Energy Interconnect.* 2020, 3, 272–282.

35. Źródło: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

nich m.in. kobalt, lit, neodym, dysproz, tantal, pallad oraz platyna. Według Międzynarodowej Agencji Energii globalne zapotrzebowanie na te minerały, ma wzrosnąć trzykrotnie do 2030 roku i czterokrotnie do 2040 roku³⁶.

Urządzenia cyfrowe (smartfony, laptopy, serwery, routery, sensory IoT) zawierają liczne pierwiastki ziem rzadkich oraz metale szlachetne. Przykładowo:

- Smartfony i tablety odpowiadają za znaczną część globalnego zapotrzebowania na kobalt (9,4%) i pallad (8,9%)³⁷
- Typowy serwer wykorzystywany w centrach danych może zawierać nawet kilkadziesiąt gramów metali rzadkich, takich jak neodym i dysproz.

Wydobycie i przetwórstwo tych surowców wiąże się z poważnymi konsekwencjami środowiskowymi. Procesy wydobywcze prowadzą do degradacji ekosystemów, wylesiania oraz utraty bioróżnorodności. Ponadto, powoduje poważne wyczerpywanie zasobów wodnych i pustynnienie, generuje znaczne ilości toksycznych i radioaktywnych odpadów, skażających okoliczną glebę i wody gruntowe oraz wiąże się z wysokimi emisjami gazów cieplarnianych³⁸.

Projektowanie produktów elektronicznych o wysokiej zawartości minerałów krytycznych zgodnie z zasadami ekoprojektowania, zapewniając ich modularność, łatwość naprawy oraz recyklingu, jest kluczowe. Istotne jest także rozwijanie modeli biznesowych bazujących na przedłużaniu życia produktów, poprzez na przykład leasing sprzętu, serwisowanie czy regenerację urządzeń. Cyfryzacja gospodarki powinna iść w parze z zamykaniem obiegu materiałów krytycznych poprzez rozwój systemów odzysku surowców z urządzeń wycofanych z eksploatacji.

5.3. Kruchość globalnych łańcuchów dostaw

Rosnąca zależność cyfryzacji od globalnych łańcuchów dostaw komponentów elektronicznych i materiałów krytycznych zwiększa podatność gospodarki na zakłócenia. Pandemia COVID-19, konflikty geopolityczne, między innymi napięcia na linii USA-Chiny czy wojna w Ukrainie, pokazały, jak wrażliwe są globalne sieci dostaw na nagłe kryzysy.

36. Źródło: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>

37. Goel, A., Masurkar, S., & Pathade, G. R. (2024). An Overview of Digital Transformation and Environmental Sustainability: Threats, Opportunities, and Solutions. *Sustainability*, 16(24), 11079. <https://doi.org/10.3390/su162411079>

38. Diao, H.; Yang, H.; Tan, T.; Ren, G.; You, M.; Wu, L.; Yang, M.; Bai, Y.; Xia, S.; Song, S.; et al. Navigating the Rare Earth Elements Landscape: Challenges, Innovations, and Sustainability. *Miner. Eng.* 2024, 216, 108889.

W szczególności sektor ICT doświadcza deficytu kluczowych komponentów, takich jak mikroprocesory czy pamięci półprzewodnikowe, których produkcja jest silnie skoncentrowana geograficznie – np. około 90% najnowocześniejszych chipów na świecie produkowanych jest na Tajwanie³⁹. Z kolei Chiny odpowiadają za ponad 60% światowej produkcji metali ziem rzadkich⁴⁰. Tego typu zależności powodują, że przedsiębiorstwa inwestujące w cyfryzację muszą liczyć się z ryzykiem opóźnień w dostawach sprzętu IT, wzrostu cen komponentów i materiałów oraz ograniczonej dostępności kluczowych technologii.

Kruchość globalnych łańcuchów dostaw wskazuje na potrzebę dywersyfikacji źródeł dostaw oraz budowania bardziej lokalnych i odpornych łańcuchów wartości. Kluczowy jest w tym wypadku odzysk surowców, recykling komponentów IT oraz rozwój własnych centrów serwisowych i naprawczych zgodnie z założeniami gospodarki obiegu zamkniętego.

39. Źródło: <https://www.osw.waw.pl/pl/publikacje/analizy/2023-08-09/tsmc-zbuduje-fabryke-w-rfn>

40. Źródło: <https://www.forbes.com/sites/miltonezrati/2023/12/11/how-much-control-does-china-have-over-rare-earth-elements/>



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



PARP
Grupa PFR