

ZUZANNA ABRICH

ORCID: 0000-0003-4800-2649

e-mail: zuzanka.abrich@gmail.com

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

Wybrane praktyczne aspekty wdrażania Przemysłu 4.0

DOI: 10.15611/2022.23.7.1

JEL Classification: D20, O14, O33, Q55

Streszczenie: Wiele przedsiębiorstw wdrażających ideę Przemysłu 4.0 w dalszym ciągu bada tematykę czwartej rewolucji przemysłowej pod kątem nowych możliwości jej wdrażania we własnych zakładach produkcyjnych. Obecnie obserwuje się trend wykorzystania technologii wytwarzania addytywnego, wraz z którym poszerzają się możliwości wprowadzania innych innowacji technologicznych dla rozwoju inteligentnych fabryk. Proces ten wspiera wzrastająca industrializacja, informatyzacja oraz cyfryzacja, wdrażanie integracji pionowej i poziomej w całych zakładach, a także nastawienie na rekonfigurację linii produkcyjnych w kierunku inteligentnego wytwarzania. Artykuł ma na celu wskazanie nowych rozwiązań dla przedsiębiorstw specjalizujących się w wytwarzaniu za pośrednictwem druku 3D, stwarzając im możliwości dalszego rozwoju w duchu czwartej rewolucji przemysłowej, a także wskazując płynące z tego tytułu korzyści i potencjalne zagrożenia.

Słowa kluczowe: Przemysł 4.0, inteligentna fabryka, integracja pozioma, integracja pionowa, Logistyka 4.0.

1. Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować szybki postęp produkcyjny w wielu dziedzinach nauki i techniki, związanych przede wszystkim z technologiami informacyjnymi i komunikacyjnymi, które bardzo szeroko oddziałują na branżę przemysłową. Przemysł 4.0 wywodzi się z projektowania nowoczesnych strategii rozwoju przemysłu ze względu na szeroki zakres zmian ukierunkowanych na przejście do inteligentnego wytwarzania. Obecnie przedsiębiorstwa starają się spełnić wymagania klientów, np. wprowadzając automatyzację i robotyzację, lecz ze względu na konieczność masowej adaptacji procesów i produktów w Przemysle 4.0 istnieje potrzeba ciągłego rozwoju nowych metod produkcji. W ten sposób druk 3D stał się ważną i obiecującą technologią wytwarzania spersonalizowanych produktów, wpływając również na zmiany w łańcuchach wartości. Obserwuje się, iż coraz więcej przedsiębiorstw korzysta z tego typu rozwiązań, nie wychodząc jednak poza dotychczas powstałe ramy technologiczne.

W niniejszym artykule przedstawiona została koncepcja Przemysłu 4.0 oraz wspierająca ją idea inteligentnych fabryk, a także zostały wskazane proponowane rekomendacje dla przedsiębiorstw wdrażających ideę Przemysłu 4.0, które swój proces wytwórczy opierają na wykorzystaniu technologii druku 3D. Przedstawione

nowe rozwiązania obejmują innowacje technologiczne, wraz z ich korzyściami i potencjalnymi zagrożeniami, oraz nowe podejście do wdrażania integracji pionowej i poziomej, które znalazły swoje odzwierciedlenie w fabrykach przedsiębiorstwa XYZ. Artykuł ten wykazuje charakter aplikacyjny ze względu na rozwój badanej dziedziny wraz z postępem technologicznym.

2. Przemysł 4.0 i jego elementy

Pojęcie **Przemysłu 4.0** zostało po raz pierwszy użyte w Niemczech podczas Targów Hanowerskich w 2011 r., gdzie niemieccy przedstawiciele nauki, biznesu i polityki przedstawili inicjatywę „Industrie 4.0” (Kagermann, Lukas i Wahlster, 2011, s. 2-3). Do tej pory wielu autorów opisało zjawisko Przemysłu 4.0, jednak nie powstała uniwersalna i powszechnie akceptowana definicja. Pojęcie to funkcjonuje zatem pod różnymi synonimami, takimi jak: **czwarta rewolucja przemysłowa** (Wang, Wan, Li i Zhang, 2016, s. 311), **produkcja cyfrowa** czy **inteligentna produkcja/inteligentne wytwarzanie** (Ramakrishna, Khong i Leong, 2017, s. 128). Wielu badaczy (Hermann, Pentek i Otto, 2016, s. 3933; Sandengen, Estensen, Rodseth i Schjolberg, 2016, s. 15; Tupa, Simota i Steiner, 2017, s. 1224; Wang i in., 2016, s. 311-320) ujmują Przemysł 4.0 jako zbiorczy termin dla technologii i koncepcji organizacji łańcucha wartości, wskazując jednocześnie na znaczenie wymiaru zarówno **technologicznego**, jak i **biznesowego**. Zazwyczaj wyjaśniają to pojęcie, przywołując wizję inteligentnych fabryk i przedstawiając technologie umożliwiające tworzenie takich zakładów produkcyjnych. Charakter czwartej rewolucji przemysłowej wyrażają również przypisywane jej determinanty, do których według N. Carvalho i in. (2018, s. 671-687) należą m.in.: interoperacyjność, decentralizacja, wirtualizacja, możliwość pracy w czasie rzeczywistym, modułowość oraz orientacja na usługi.

2.1. Inteligentne fabryki

Główną rolę wśród czynników technologicznych ze względu na wdrażanie koncepcji Przemysłu 4.0 w świecie fizycznym odgrywają **inteligentne fabryki**. Ta inicjatywa technologiczna rządu niemieckiego wdraża elementy czwartej rewolucji przemysłowej w funkcjonowanie zakładów produkcyjnych w celu stworzenia wspólnej pracowni służącej innowacjom w zakresie technik produkcyjnych (Cadavid, Alférez, Gérard i Tessier, 2015, s. 72). Funkcjonowanie *Smart Factory* opiera się na inteligentnych systemach cyberfizycznych, które mogą podejmować autonomiczne decyzje i komunikować się ze sobą w czasie rzeczywistym, gdzie istotną rolę odgrywa również Internet rzeczy, ponieważ umożliwia działanie inteligentnego, połączonego w sieć systemu (Hermann, Pentek i Otto, 2016, s. 3930). W ramach pojęcia inteligentnej fabryki stosuje się również terminy: **wszechobecna fabryka** (Yoon, Shin i Suh, 2012, s. 2174-2189), **fabryka rzeczy** (Zuehlke, 2010, s. 129-138), **fabryka czasu rzeczywistego** (Hameed, Khan, Dürr i Rothermel, 2010,

s. 1-8) lub **inteligentna fabryka przyszłości** (Westkämper, 2008, s. 14). W literaturze występuje wiele definicji *Smart Factory*, przedstawionych z perspektywy różnych badaczy (Lucke, Constantinescu i Westkämper, 2008, s. 115; Park, 2016, s. 745; Prause i Weigand, 2016, s. 105; Radziwon, Bilberg, Bogers, Madsen, 2014, s. 1187; Sjödin, Parida, Leksell i Petrovic, 2018, s. 23; Wang i in. 2016, s. 159; Wang, Wan, Li i Liu, 2018, s. 1). Ich synteza pozwala na wskazanie celu inteligentnych fabryk, którym jest zwiększanie systematycznego ponownego wykorzystania procesów i poprawa zrozumiałości złożonych struktur w procesach produkcyjnych (Cadavid, Alférez, Gérard i Tessier, 2015, s. 72). Ideą jest skonstruowanie CPS zorientowanych na produkcję w celu wdrożenia pionowej integracji jednostek fizycznych i systemów informacyjnych, tak aby ostatecznie osiągnąć elastyczną produkcję i procesy produkcyjne samodostosowujące się do maszyn i produktów, które działają zarówno inteligentnie, jak i autonomicznie (Shi i in., 2020, s. 609).

2.1.1. Technologie w inteligentnych fabrykach

Działanie inteligentnych fabryk wspierają technologie, uważane za rdzeń Przemysłu 4.0, ponieważ jego sieć jest wspierana przez zastosowanie oprogramowania, czujników, procesorów i technologii komunikacyjnych (Bahrin, Othman, Azli i Talib, 2016, s. 138). Należą do nich przede wszystkim inteligentne sensory i aktuatory, technologie RFID, geolokalizacja oraz interfejsy mobilne (Mychlewicz i Piątek, 2017, s. 20). Wspomagają one funkcjonowanie technologii, na których opiera się działanie inteligentnych fabryk. N. Karnik i in. (2022, s. 2) dzielą je na cztery kategorie, które wraz z odpowiadającymi im rozwiązaniami technologicznymi przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Kluczowe technologie w Przemysle 4.0

Kategorie technologii	Rozwiązania technologiczne
Fizyczno-cyfrowe technologie interfejsów	<ul style="list-style-type: none"> • systemy cyberfizyczne (<i>Cyber-Physical Systems</i> – CPS) • Internet rzeczy (<i>Internet of Things</i> – IoT) • Internet usług (<i>Internet of Services</i> – IoS) • technologia rozszerzonej rzeczywistości (<i>Augmented Reality</i> – AR) • technologia wirtualnej rzeczywistości (<i>Virtual Reality</i> – VR)
Technologie przetwarzania danych	<ul style="list-style-type: none"> • analityka <i>big data</i> • sztuczna inteligencja (<i>Artificial Intelligence</i> – AI) • uczenie maszynowe (<i>Machine Learning</i> – ML) • techniki symulacji i modelowania
Technologie sieciowe	<ul style="list-style-type: none"> • chmura obliczeniowa • cyberbezpieczeństwo • technologia <i>blockchain</i>
Cyfrowo-fizyczne technologie procesowe	<ul style="list-style-type: none"> • technologie wytwarzania addytywnego (<i>Additive Manufacturing</i> – AM) • inteligentne roboty

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Culot, Nassimbieni, Orzes i Sartor, 2020, s. 5-7; Karnik, Bora Bhardi, Kadambi i Dhattrak, 2022, s. 2-3).

2.1.2. Integracje w inteligentnych fabrykach

Najważniejsze zjawisko biznesowe odnosi się do zmian w łańcuchach wartości wprowadzanych przez komunikację i wymianę danych. Można zaobserwować trzy rodzaje zmian (Wang i in., 2016, s. 311): **integrację poziomą poprzez sieci wartości, kompleksową cyfrową integrację inżynieryjną w całym łańcuchu wartości oraz integrację pionową i sieciowe systemy produkcyjne.**

Integracja pozioma oznacza integrację różnych systemów informatycznych dla różnych etapów procesu produkcji i planowania korporacyjnego, pomiędzy którymi zachodzi przepływ materiałów, energii i informacji, dzięki czemu mogą powstawać nowe sieci wartości oraz modele biznesowe (Wang i in., 2016, s. 312). Odbywa się to zarówno w obrębie jednego przedsiębiorstwa (np. logistyka przychodząca, produkcja, logistyka wychodząca, marketing), jak i pomiędzy wieloma przedsiębiorstwami (sieci tworzenia wartości) w celu utworzenia spójnego rozwiązania. Na podstawie integracji poziomej powstają łańcuchy i sieci wartości ponad granicami przedsiębiorstw, ułatwiające współpracę między nimi.

Kompleksowa cyfrowa integracja inżynieryjna opiera się na koncepcji rozszerzenia projektu produkcyjnego poza proces produkcji, aby objąć wszystkie aspekty łańcucha wartości, poprzez uwzględnienie całego cyklu życia produktu jako części jego procesu produkcji (Aoun, Ilinca, Ghandour i Ibrahim, 2021, s. 4). W związku z tym podejście to pozwala na współpracę między procesem produkcji dowolnego wyrobu a różnymi procesami i usługami wchodzącymi w skład łańcucha wartości zorientowanego na produkt. Należą do nich działania, takie jak: określanie wymagań klienta, projektowanie i rozwój produktu, planowanie produkcji, inżynieria produkcji, produkcja, usługi, konserwacja i recykling. Dzięki integracji ciągły i spójny model produktu może być ponownie wykorzystany na każdym etapie. Wpływ projektu produktu na produkcję i usługi może być przewidziany przy użyciu wydajnego łańcucha narzędzi programowych, co umożliwia tworzenie produktów dostosowanych do potrzeb klienta.

Integracja pionowa oznacza połączenie różnych systemów informatycznych na różnych poziomach hierarchicznych (np. na poziomach aktuatorów i czujników, sterowania, zarządzania produkcją, produkcji i jej realizacji czy planowania korporacyjnego) w jedno zintegrowane rozwiązanie. Niezbędna jest pionowa integracja sygnałów z siłownikami i czujnikami na różnych poziomach – aż do poziomu systemów ERP, aby umożliwić elastyczny i rekonfigurowalny system produkcyjny (ACATECH, 2013, s. 32). Dzięki takiej integracji inteligentne maszyny tworzą samoorganizujący się system, który może być dynamicznie rekonfigurowany w celu dostosowania do różnych typów produktów, a dane gromadzone i przetwarzane są dla zapewnienia przejrzystości procesu produkcyjnego.

Elementy te są decydującymi czynnikami umożliwiającymi przemysłowi wytwórczemu osiągnięcie stabilnej pozycji w środowisku rynkowym o dużej zmienności, a jednocześnie elastyczne dostosowanie tworzenia własnej wartości do

zmieniających się wymagań rynku. Dzięki zastosowaniu koncepcji Przemysłu 4.0 w inteligentnych fabrykach horyzontalne sieci tworzenia wartości są realizowane na poziomie strategicznym, poziom procesów biznesowych, w tym inżynieryjnych, jest projektowany spójnie w całym łańcuchu wartości, a systemy produkcyjne jako zintegrowane pionowo i połączone w sieć. W tym wzajemnie połączonym środowisku pojawiają się nowe sposoby tworzenia wartości i nowe modele biznesowe wraz z inteligentnymi produktami i usługami (Nosalska, Piątek, Mazurek i Rządca, 2019, s. 849). Ze względu na rosnącą rolę personalizacji zwiększa się również wpływ klientów na proces tworzenia wartości (von Leipzig i in., 2017, s. 518).

2.2. Logistyka 4.0

Przemysł 4.0 jest także ściśle związany z logistyką, która w tradycyjnym ujęciu obejmuje planowanie, realizację i kontrolę wydajnego, skutecznego przepływu i magazynowania towarów i usług z punktu początkowego pochodzenia zewnętrznego do przedsiębiorstwa oraz z przedsiębiorstwa do punktu konsumpcji w celu spełnienia wymagań klienta (Lummus, Krumwiede, Vokurka, 2001, s. 426). Pojęcie **Logistyki 4.0** pojawiło się jako odpowiedź branży logistycznej na rozwój i wymagania Przemysłu 4.0, takie jak elastyczność, adaptacyjność, proaktywność i samoorganizacja, które zyskują na znaczeniu i są możliwe do osiągnięcia jedynie poprzez integrację nowych inteligentnych technologii. Wraz z zastosowaniem tej koncepcji do działań logistycznych obszar ten został nazwany Logistyką 4.0 lub Inteligentną Logistyką, ponieważ jest to system logistyczny, który może zwiększyć elastyczność i dostosowanie do zmian na rynku oraz sprawić, że firma będzie bliżej potrzeb klienta (Barreto, Amaral, Pereira, 2017, s. 1248). Dla połączenia koncepcji Logistyki 4.0 i Przemysłu 4.0 wskazuje się trzy aspekty (Winkelhaus i Grosse, 2020, s. 20):

- implikacje zmian paradygmatu produkcji w kierunku masowej personalizacji,
- zmiany procesów logistycznych spowodowane wykorzystaniem nowych technologii cyfrowych oraz
- znaczenie ludzi w ich rolach jako pracownicy, klienci i inni interesariusze, którym również towarzyszą zmiany w środowisku.

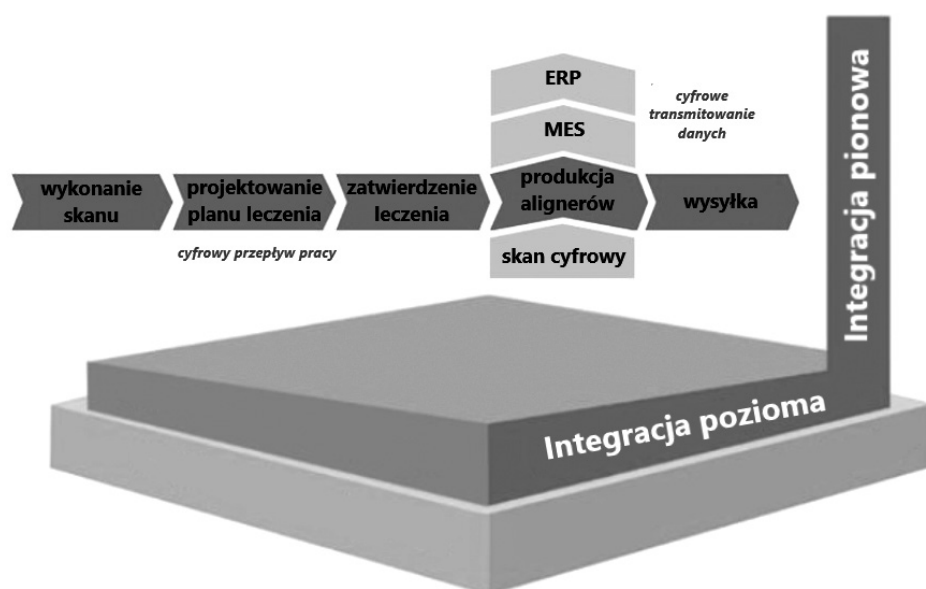
W tym ujęciu można zdefiniować Logistykę 4.0 jako system logistyczny, zapewniający trwale zaspokajanie zindywidualizowanych potrzeb klientów bez wzrostu kosztów i wspierający ten rozwój w przemyśle i handlu, wykorzystując technologie cyfrowe (Winkelhaus i Grosse, 2020, s. 21).

3. Rozwiązania wykorzystywane w przedsiębiorstwie

Przedsiębiorstwo XYZ jest globalną firmą działającą w branży urządzeń medycznych, zajmującą się projektowaniem i produkcją spersonalizowanych nakładek na zęby Invisalign®, skanerów wewnątrzustnych iTero® oraz oprogramowania CAD/CAM exocad® (*Align Technology 2020...*).

Proces wytwórczy alignerów jest istotą wdrożenia Przemysłu 4.0 dzięki wykorzystaniu technologii, takich jak CPS, *big data*, *cloud computing*, techniki symulacji i modelowania, RFID czy druk 3D. Obszar logistyki w fabrykach przedsiębiorstwa XYZ obejmuje nie tylko procesy, takie jak pakowanie i wysyłka alignerów, ale również integracje, które pozwalają na dopasowywanie się do zmian rynkowych, przy zachowaniu elastycznego tworzenia wartości dodanej.

Integracja pozioma poprzez sieci wartości obejmuje cyfrowy przepływ pracy. Obrazuje on proces od wykonania skanu za pomocą skanerów iTero® w gabinecie stomatologicznym/ortodontycznym, przez zaprojektowanie w programie CAD/CAM etapów planu leczenia, jego zatwierdzenie, aż po produkcję alignerów i ich wysyłkę do klienta. Jest to możliwe dzięki ścisłej współpracy firmy z lekarzami z całego świata, wykorzystującymi skanery iTero®, zespołom CAD designerów, pełniącym kluczową funkcję w tworzeniu ścieżki korekcji uzębienia pacjentów oraz fabrykom wyposażonym w innowacyjne technologie, umożliwiające tworzenie spersonalizowanych nakładek na zęby. Wykonany cyfrowy skan przesyłany jest do placówek leczenia, w których działy projektantów za pomocą oprogramowania CAD/CAM i narzędzi symulacyjnych opracowują przejście szczęki przez poszczególne etapy leczenia. Na podstawie tej wizualizacji powstają wytyczne dla urządzeń produkcyjnych – drukarek 3D, które formują modele szczęki, będące bazą do powstawania alignerów. Po etapie produkcyjnym następuje wysyłka gotowych nakładek do lekarzy stomatologów, którzy wdrażają proces leczenia.



Rys. 1. Integracje w fabrykach przedsiębiorstwa XYZ jako nowy wymiar logistyki

Źródło: opracowanie własne.

Integrację pionową wraz z sieciowymi systemami produkcyjnymi obrazuje cyfrowe transmitowanie danych, przechodzących przez różne systemy wewnętrzne przedsiębiorstwa – od początkowej informacji, wygenerowanej jako skan cyfrowy, po systemy MES i ERP, które wykorzystuje przedsiębiorstwo. Informacje te przesyłane są przez różne działy: projektowe, produkcyjne, logistyczne itd., które dzięki wykorzystaniu systemów CPS nadzorują wytwarzanie alignerów w taki sposób, aby każda powstała nakładka odpowiadała indywidualnym danym, zebranym od konkretnego pacjenta. Stała ich kontrola i przetwarzanie, przy zachowaniu zasad cyberbezpieczeństwa, zapewnia klarowność oraz elastyczność całego procesu produkcyjnego, a także łatwą programowalność urządzeń, które stają się bardziej adaptacyjne w stosunku do zmian na linii produkcyjnej.

Integracje te przenikają się wzajemnie na etapie wytwarzania – od powstawania modeli 3D, nakładek, a w rezultacie ich zapakowania i wysłania do klienta. Jest to możliwe dzięki zorientowaniu na klienta, a także na sam produkt – który jest wynikiem indywidualnych preferencji odbiorcy. Kluczową rolę odgrywają wymagania każdego pacjenta w stosunku do produktu końcowego, projektowanie wyrobu oraz planowanie, rozwój i wpływ na cykl życia produktu.

4. Proponowane innowacje technologiczne

Obecnie w każdej z fabryk urządzenia są ze sobą połączone za pośrednictwem sieci, co umożliwia programowanie maszyn i kontrolę procesów produkcyjnych oraz pozaprodukcyjnych. W dalszym ciągu jednak ważną funkcję w większości operacji pełnią ludzie, ponieważ połączenia te nie umożliwiają bezpośredniej komunikacji między urządzeniami, co mogłoby się przyczynić do poprawy sprawności, reaktywności oraz zautomatyzowania ich pracy. Do tego celu może się z pewnością przyczynić wykorzystanie Internetu rzeczy. Elementy technologiczne, umożliwiające wdrożenie IoT (Lee i Lee, 2015, s. 432-433), stanowią:

- tagi RFID, używane do identyfikacji obiektów,
- bezprzewodowe sieci czujników, stosowane w celu śledzenia i monitorowania obiektów (np. monitorowania ich lokalizacji),
- oprogramowanie pośredniczące (*middleware*), umożliwiające wzajemne komunikowanie się połączonych ze sobą urządzeń (poprzez RFID czy M2M),
- chmura obliczeniowa, pozwalająca na pobieranie informacji z urządzeń w czasie rzeczywistym, oraz
- aplikacje związane z IoT, tworzące interfejs zapewniający interakcje między urządzeniami a ludźmi.

Internet rzeczy zaimplementowany wraz z technologią druku addytywnego tworzy połączone środowisko składające się z „sieci łączących sieci”, wykorzystywanych do obsługi systemów produkcyjnych w czasie rzeczywistym (Ashima i in., 2021, s. 5084). W systemach tych produkty są projektowane, opracowywane i dostarczane. Systemy cyberfizyczne połączone z drukiem 3D mają zastosowanie

w procesach produkcji i konserwacji, umożliwiając również wykonywanie wielowymiarowego wytłaczania i swobodę projektowania (Mehrrouya i in., 2019, s. 7). Komponenty IoT są wbudowane w urządzenia do druku 3D, takie jak oprogramowanie CAD, urządzenia IoT, drukarki czy interfejsy człowiek–maszyna. Urządzenia do wytwarzania addytywnego są instalowane z urządzeniami IoT, które umożliwiają przesyłanie danych do interfejsu człowiek–maszyna – będącego dowolną platformą urządzenia (np. smartfonu, tabletu czy laptopa). Interfejsy te przesyłają dane do platform chmurowych, które je identyfikują i wyszukują treści związane z uzyskanymi informacjami, a także udostępniają tę zawartość w całej platformie, w tym w drukarce 3D. Dzięki temu wgląd w jej działanie jest możliwy z dowolnego miejsca, niezależnie od odległości użytkownika i maszyny (Ashima i in., 2021, s. 5084).

Zastosowanie Internetu rzeczy do automatyzacji procesów wytwarzania addytywnego wiąże się również z wykorzystaniem wielu technologii wspomaganych przez IoT, do których należą m.in.: sztuczna inteligencja z elementami uczenia maszynowego, rzeczywistość rozszerzona, cyfrowy bliźniak, *blockchain* czy inteligentne roboty.

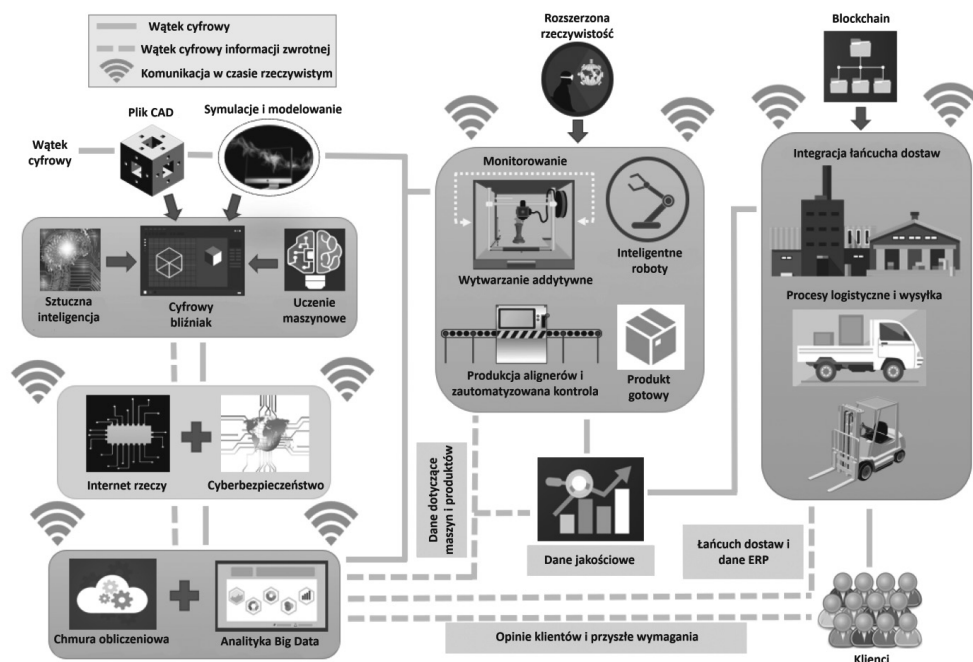
Sztuczna inteligencja z elementami uczenia maszynowego oraz cyfrowymi bliźniakami znajduje swoje zastosowanie w monitorowaniu w czasie rzeczywistym stanu maszyn wytwórczych i klasyfikacji pozostałego okresu użytkowania (*Remaining Useful Life* – RUL) aplikacji i urządzeń (Agron, Nwakanma, Lee i Kim, 2020, s. 1203). Do metod uczenia maszynowego należą przede wszystkim maszyna wektorów nośnych (*Support Vector Machine* – SVM) i sztuczna sieć neuronowa (*Artificial Neural Networ* – ANN) (Zhang i in., 2019, s. 2). Sztuczne sieci neuronowe to zdigitalizowane modele ludzkiego mózgu – programy komputerowe zaprojektowane w celu symulowania sposobu, w jaki ludzki mózg przetwarza informacje. ANN uczą się (lub są trenowane) poprzez doświadczenie z odpowiednimi przykładami uczenia się, gromadząc wiedzę, wykrywając wzorce i zależności w danych. Gdy sieci neuronowe są wykorzystywane do analizy danych, ważne jest rozróżnienie między modelami ANN (układem sieci) a algorytmami ANN (obliczeniami, które ostatecznie dają wyniki sieci). Po skonstruowaniu sieci na potrzeby konkretnego zastosowania można ją trenować. Jednym z typów ANN jest mapa Kohonena, nazywana również mapą samoorganizującą się (*Self Organizing Map* – SOM) z algorytmem uczenia nienadzorowanego, która nadaje się do znajdowania relacji między złożonymi zbiorami danych (Agatonovic-Kustrin i Beresford, 2000, s. 721). Wykorzystanie tej technologii w przedsiębiorstwie XYZ może pomóc w zneutralizowaniu jednego z powszechnie występujących problemów drukarek 3D, jakim jest wysoki poziom stężenia tlenu wewnątrz tych urządzeń powstający podczas ich pracy. Dopuszczalne stężenie tlenu dla zachowania najwyższej jakości drukowanego produktu wynosi 0,2% (Guo, Lv i Bai, 2019, s. 102). Jeśli przekroczy ono wartość progową, zwiększa się ryzyko wystąpienia dużej porowatości na drukowanym produkcie. ANN może służyć do przewidywania w czasie rzeczywistym progu zużycia tlenu i podejmowania działań w przypadku wykrycia progu wymagającego uzupełnienia. W tym celu w drukarce SLA

3D umieszcza się czujnik tlenu, który jest podłączony do urządzenia do akwizycji danych (*Data Acquisition Device*), które zbiera dane z czujnika i przekazuje je do komputera w celu ich przetworzenia. Są one następnie filtrowane i rejestrowane w lokalnej bazie danych, a porównanie ich z wartością progową wskazuje, czy stan środowiska drukowania jest normalny, czy też alarmowy. Jeśli zebrane dane zawierają błąd, system uruchamia alarm, który wysyła do administratora ostrzeżenie o nieprawidłowościach dotyczących wartości uzyskanych przez czujniki (Agron i in., 2020, s. 1203-1204). Wartości te mogą prowadzić do wniosków, takich jak: brak równowagi w poziomie tlenu, czujniki nie działają lub czujniki nie działają prawidłowo. W przeciwnym razie urządzenie kontynuuje normalną pracę. Następnie sprawdzany jest postęp drukowania, zatem dopóki nie zostało ono zakończone, czujniki zbierają dane. Gdy sieć neuronowa wykryje wzór wprowadzania danych, który może prowadzić do naruszenia wartości progowych, wysyła sygnał do aktywacji silnika, którego zadaniem jest przepłukiwanie gazu wewnątrz drukarki 3D (Agron i in., 2020, s. 1204). Do tego procesu stosuje się samoorganizującą się mapę, ze względu na szybkość konwersji informacji, charakterystyczną nawet dla nieliniowych danych wejściowych. SOM identyfikuje próbki lub dane, z których podobne są grupowane razem, co zmniejsza wymiar zbioru danych i prowadzi do wygenerowania mapy reprezentującej poszczególne klastry naruszające wartości progowe zużycia tlenu.

Termin *Digital Twin* jest obecnie używany jako synonim modelu wirtualnego. Istnieją trzy różne kategorie tych modeli, które zależą od poziomu ich integracji lub przepływu danych: model cyfrowy (*digital model*), cyfrowy cień (*digital shadow*) oraz cyfrowy bliźniak (*Digital Twin, DT*) (Shimamura, Fagle i Timper, 2021). Cyfrowy bliźniak jest tworzony przy zachowaniu najwyższego poziomu integracji pomiędzy sferą fizyczną i wirtualną, wykorzystując automatyczny przepływ danych w obu kierunkach. Może on gromadzić dane i na ich podstawie podejmować decyzje w czasie rzeczywistym, które optymalizują różne parametry, opierając się na otoczeniu produktu lub systemu, w celu zwiększenia jego jakości i/lub wydajności. DT jest obecnie postrzegany jako kluczowy czynnik umożliwiający rozwój Przemysłu 4.0, który będzie zintegrowany na poziomie zarówno holistycznym, jak i lokalnym w fabrykach przyszłości. W ujęciu holistycznym jest on narzędziem wykorzystywanym do sterowania układem oraz przepływem materiałów i procesów na hali produkcyjnej, natomiast na poziomie lokalnym jest narzędziem do optymalizacji jakości produktów poprzez zbieranie danych w czasie rzeczywistym z działających maszyn i urządzeń za pomocą czujników, a następnie ich wykorzystanie do poprawy różnych parametrów. Zastosowanie cyfrowego bliźniaka w procesie wytwarzania addytywnego przedsiębiorstwa XYZ może ułatwić symulację modeli szczęki poszczególnych pacjentów i podnieść poziom jej dokładności na etapie projektowania dzięki zebraniu danych, które zwiększą wiarygodność symulacji. Gromadzenie danych podczas faz planowania i wytwarzania może przyczynić się do identyfikowania różnych parametrów i ich optymalizacji zgodnie z produktem,

a także jego otoczeniem. Dodatkowo DT może być zastosowany do weryfikacji dynamicznej realizacji nowych systemów, na wczesnym etapie ich wdrażania, a dzięki wykorzystaniu danych *online* pozwoli również na poprawę wydajności operacyjnej systemu produkcyjnego. Zintegrowany, obejmujący całą fabrykę cyfrowy bliźniak będzie stanowił główny element cyberfizycznego systemu produkcyjnego, odgrywając rolę platformy umożliwiającej współpracę różnych systemów wirtualnych w czasie rzeczywistym. Po wprowadzeniu system cyfrowego bliźniaka może – dzięki dodatkowym technologiom – identyfikować i integrować nowo przybyłe maszyny lub zasoby. Możliwym obszarem zastosowania DT w przedsiębiorstwie jest również zwiększona digitalizacja, która może oznaczać redukcję procesów wymagających ludzkiego nadzoru. Technologia ta może pomóc firmie w lepszej cyfrowej komunikacji z lekarzami, a także w minimalizacji wymaganej pracy ręcznej na hali produkcyjnej dzięki umożliwieniu stosowania CPPS. System cyfrowego bliźniaka można zaprogramować również w celu zwiększenia szybkości wytwarzania addytywnego poprzez optymalizację parametrów: prędkości dyszy, temperatury dyszy i szybkości wytłaczania. Do jego stworzenia potrzebny jest system, w którym przeprowadzane będą symulacje rozkładu termicznego w trakcie całego procesu, i/lub biblioteka poprzednich prób, w których za pomocą uczenia maszynowego można będzie zoptymalizować te parametry. Dodatkowo taki system mógłby rejestrować, kiedy drukarki są używane i jakie zamówienia są drukowane, aby scentralizować te dane w celu zwiększenia wykorzystania materiału.

Technologia *blockchain* to system umożliwiający wykonywanie bezpiecznych i zdecentralizowanych transakcji za pośrednictwem rozproszonej księgi transakcyjnej. Technologia ta może być wykorzystywana jako zabezpieczenie, rejestrujące i weryfikujące wszystkie etapy cyklu życia maszyn wytwarzania addytywnego (Ghimire i in., 2021, s. 2170). Najczęstszym wykorzystaniem technologii *blockchain* są inteligentne kontrakty (Szabo, 1997), czyli samorealizujące się umowy, w których warunki umowy między kupującym a sprzedającym są zapisane bezpośrednio w linijkach kodu. Kod inteligentnego kontraktu jest wykonywany, gdy spełniony jest określony warunek podany przez twórcę – wtedy wykonywany jest program. Inteligentny kontrakt jest przechowywany w sieci *blockchain*, a po jego wdrożeniu nie można już wprowadzać do niego żadnych zmian. W tym przypadku technologia ta stanowi rozwiązanie w zakresie ochrony praw autorskich i własności przemysłowej, certyfikacji i zrównoważonej odpowiedzialności w zakresie powielania. W produkcji przyrostowej dane są spójne z całym procesem cyklu życia produktu, co w przypadku *blockchainu* gwarantuje, że systemy komponentów drukowanych w 3D są dokładne i adaptowalne, oraz chroni model ekonomiczny właścicieli inteligentnej własności przemysłowej i producentów części drukowanych. Umożliwienie przez podmiot XYZ korzystania z patentów na wytwarzanie alignerów innym firmom wiąże się z wysokim ryzykiem kradzieży praw intelektualnych. W związku z tym wprowadzenie *blockchainu* na poziomie węzła transakcyjnego zapewni identyfikowalność wszystkich aktywów oraz uwierzytelnienie plików projektowych.



Rys. 2. Architektura fabryki przedsiębiorstwa XYZ po wdrożeniu proponowanych rozwiązań *Smart Factory*

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Butt, 2020, s. 22).

Rozpoczyna się to już w fazie projektowania, gdzie ostateczna struktura części i wszystkie jej dane inżynierskie muszą być traktowane jako aktywa o wysokiej wartości, które należy chronić. Przechowywanie transakcji sprzedaży może wymagać szyfrowania plików, cyfrowych licencji oraz cyfrowego zaufania. Poprzez szyfrowanie plików projektowych projektanci zapewniają, że tylko upoważnieni użytkownicy będą mogli uzyskać dostęp do przesłanych informacji. W ten sposób uniemożliwiają dostęp do plików projektowych aż do momentu ich usunięcia przez maszyny drukujące. Inteligentny kontrakt służy następnie jako mechanizm licencjonowania, pozwalający właścicielowi własności intelektualnej określić, kto może uzyskać dostęp do tych danych, na jaki czas i w jaki sposób dane te powinny być wykorzystywane w produkcji. Projektant wysłał zaszyfrowane pliki projektowe – wraz z powiązaną z nimi cyfrową kopią, czyli cyfrowym bliźniakiem – do spółek zależnych, które są częścią łańcucha, posługując się pocztą elektroniczną, programem *offline*, korzystając z bezpośredniego dostępu do serwera firmy lub przesyłając z jednej aplikacji do drugiej, w zależności od wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Gdy tworzony jest komponent wizualny, musi on zostać oznaczony cyfrową referencją i zapisany w księdze głównej. Użytkownik końcowy lub jakikolwiek uczestnik łańcucha będzie miał możliwość sprawdzenia, skąd pochodzi dany produkt oraz

jakie etapy i procesy przeszedł. Zapewni to również, że informacje będą poprawne, ponieważ zostały zapisane w *blockchainie*, czyli są niezmiennie, oraz monitorowanie wydruków 3D za pomocą platform chmurowych.

4.1. Korzyści i zagrożenia wynikające z wdrożenia rekomendowanych rozwiązań

Wprowadzenie nowych rozwiązań może prowadzić do różnych rezultatów, a także wpłynąć na cały proces wytwórczy alignerów. W tabeli 2 zostały przedstawione korzyści i zagrożenia wynikające z wdrożenia rekomendowanych technologii i narzędzi z obszaru *Smart Factory* do funkcjonowania fabryk przedsiębiorstwa XYZ.

Tabela 2. Korzyści i zagrożenia związane z wprowadzeniem poszczególnych rozwiązań *Smart Factory* w przedsiębiorstwie XYZ

Rozwiązania <i>Smart Factory</i>	Korzyści	Zagrożenia
Internet rzeczy	<ul style="list-style-type: none"> połączenie maszyn i urządzeń w inteligentną sieć, gromadzenie, analizowanie i dostarczanie danych w czasie rzeczywistym, zapewnienie rozproszonego środowiska, automatyzacja procesów produkcyjnych pozaprodukcyjnych 	<ul style="list-style-type: none"> zwiększone ryzyko cyberataków i rozpowszechniania poufnych informacji, wysokie koszty wdrożenia i rozwoju, niejednorodność urządzeń zintegrowanych z IoT, ograniczenia możliwości infrastruktury informatycznej
Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe	<ul style="list-style-type: none"> monitorowanie maszyn i urządzeń w czasie rzeczywistym, symulacja zdarzeń z dokładnością ludzkiego umysłu, reaktywność na problemy i awarie, kompleksowa analiza danych 	<ul style="list-style-type: none"> niewłaściwe wykorzystywanie danych i ryzyko ich utraty, problemy technologiczne, niewłaściwe wirtualne modele dostarczające tendencyjnych wyników, nieodpowiednie sposoby trenowania
Cyfrowy bliźniak	<ul style="list-style-type: none"> automatyczne podejmowanie decyzji, analiza danych w czasie rzeczywistym, optymalizacja parametrów, platforma współpracy systemów, identyfikacja i integracja nowych zasobów/maszyn, zmniejszanie liczby defektów 	<ul style="list-style-type: none"> niedostarczenie odpowiednich informacji, prowadzące do niespójnych wyników symulacji, kosztowny proces wdrażania
<i>Blockchain</i>	<ul style="list-style-type: none"> ochrona własności intelektualnej i prywatnych danych, wspólna baza danych, zdecentralizowane transakcje, automatyzacja procesów biznesowych, bezpieczne inteligentne kontrakty 	<ul style="list-style-type: none"> trudności w wyborze udostępnianych danych, rosnąca liczba cyberataków

Źródło: opracowanie własne.

5. Podsumowanie

Wysoki poziom wirtualizacji i obecności cyfrowej obrazują przenikające się integracje pozioma i pionowa, obejmujące cyfrowy przepływ pracy – od momentu wykonania cyfrowych skanów zębów, do dostarczenia produktów klientowi – oraz cyfrowe transmitowanie danych, przechodzących przez różne systemy wewnętrzne przedsiębiorstwa. Integracje te stanowią nowy wymiar logistyki, ilustrując innowacyjne i kompleksowe podejście przedsiębiorstwa do aspektów logistycznych. Opatentowane przez firmę autorskie rozwiązania, dotyczące zarówno procesów wytwarzania, jak i zindywidualizowanych produktów, obrazują dążenie firmy do automatyzacji wykonywanych operacji, włączając pacjentów, lekarzy, CAD designerów oraz zakłady produkcyjne w łańcuch wartości. Analiza wyżej wymienionych aspektów pozwoliła na wykrycie obszarów, w ramach których możliwe jest wprowadzenie nowych rozwiązań w fabrykach, zapewniających szersze wykorzystanie potencjału inicjatywy *Smart Factory*. Proponowane do wdrożenia technologie obejmują Internet rzeczy, sztuczną inteligencję z elementami uczenia maszynowego w postaci sztucznych sieci neuronowych, rozszerzoną rzeczywistość, cyfrowe bliźniaki, *blockchain* oraz inteligentne roboty, takie jak coboty czy AGV. Rozwiązania te mogą zapewnić firmie XYZ, ale też innym przedsiębiorstwom wytwórczym, dążącym do spełnienia wymagań inteligentnej produkcji, utworzenie zaufanego środowiska dla inteligentnych, komunikujących się ze sobą maszyn i urządzeń, zdolnych do reagowania na zmiany, autonomicznego podejmowania decyzji czy samodiagnozowania. Umożliwią również gromadzenie, analizę i wykorzystywanie danych w czasie rzeczywistym, zmniejszenie partycypacji ludzi w procesach produkcyjnych, jak również zwiększą poziom bezpieczeństwa w zakresie ochrony własności intelektualnej. Zaimplementowanie tych rozwiązań może także stwarzać pewne zagrożenia, do których należy przede wszystkim ryzyko związane z danymi, takie jak cyberataki, dostarczanie nieodpowiednich danych, ich niewłaściwe wykorzystywanie i udostępnianie nieupoważnionym użytkownikom, co może generować przestoje w produkcji, a także prowadzić do utraty prywatnych informacji, a tym samym zszargania reputacji przedsiębiorstwa. Aspekty te w połączeniu z ograniczeniami możliwości infrastruktury informatycznej mogą prowadzić do pogorszenia pracy maszyn i urządzeń, których wdrożenie powinno zapewnić większą automatyzację, ale w tym przypadku doprowadzi do osiągnięcia niemiarodajnych wyników. Złe trenowanie inteligentnych urządzeń, a także ich niejednorodność może generować błędne modele wirtualne, niepozwalające na osiągnięcie efektywnego uczenia się maszyn. Wiele z tych technologii niesie ze sobą także wysokie koszty ich wdrożenia i utrzymania, a także konieczność przeprojektowywania infrastruktury i procesów. Należy także pamiętać o istotnej roli ludzi w funkcjonowaniu całych fabryk, którzy w dalszym ciągu będą nadzorować pracę inteligentnych maszyn, których autonomiczne działanie obecnie wymaga jeszcze ich obecności. Zarówno korzyści, jak i potencjalne zagrożenia wynikające z rozwiązań proponowanych do wdrożenia w przedsiębiorstwie XYZ ze

względu na ich rozwój w dobie czwartej rewolucji przemysłowej wymagają identyfikacji i szerszej analizy. Jednakże wskazane w pracy rekomendacje mają ogromny potencjał dla wspierania realizacji koncepcji Przemysłu 4.0, będącej fundamentem fabryk przyszłości.

Literatura

- ACATECH. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das zukunftsprojekt INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Pobrane z <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/>
- Agatonovic-Kustrin, S. i Beresford, R. (2000). Basic concepts of Artificial Neural Network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 22(5), 717-727.
- Agron, D., Nwakanma, C., Lee, J. i Kim, D. (2020). Smart monitoring for SLA-type 3D printer using artificial neural network. *KICS*, (72), 1203-1204.
- Align Technology 2020 Annual Report*. (b.d.). Pobrane z <https://investor.aligntech.com/static-files/a1add55d-f7ce-4ee8-b020-03ef89575982>
- Aoun, A., Ilinca, A., Ghandour, M. i Ibrahim, H. (2021). A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 1-11.
- Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S. i Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, (45), 5081-5088.
- Bahrin, K., Othman, F., Azli, N. i Talib, F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, (78), 137-143.
- Barreto, L., Amaral, A. i Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, (13), 1245-1252.
- Butt, J. (2020). Exploring the interrelationship between additive manufacturing and Industry 4.0. *Designs*, 4(2), 1-33.
- Cadavid, J., Alférez, M., Gérard, S. i Tessier, P. (2015). *Conceiving the model-driven smart factory. W: Proceedings of the 2015 international conference on software and system proces (ICSSP 2015)* (s. 72-76). Nowy Jork, USA.
- Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E. i Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, (21), 671-687.
- Culot, G., Nassimbieni, G., Orzes, G. i Sartor, M. (2020). Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. *International Journal of Production Economics*, (226), 1-15.
- Ghimire, T., Joshi, A., Sen, S., Kapruan, C., Chadha, U. i Selvaraj, S. (2021). Blockchain in additive manufacturing processes: recent trends & its future possibilities. *Materials Today: Proceedings*, 50(5), 2170-2180.
- Guo, H., Lv, R. i Bai, S. (2019). Recent advances on 3D printing graphene-based composites. *Nano Materials Science*, 1(2), 101-115.
- Hameed, B., Khan, I., Dürr, F. i Rothermel, K. (2010). An RFID based consistency management framework for production monitoring in a smart real-time factory. *2010 Internet of Things (IOT)*, 1-8.
- Hermann, M., Pentek, T. i Otto B. (2016). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review* (49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, Hawaje, s. 3928-3937).
- Kagermann, H., Lukas, W. i Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem internet der dinge auf dem weg zur 4. industriellen revolution. *VDI Nachrichten*, 13(1), 2-3.

- Karnik, N., Bora, U., Bhardi, K., Kadambi, P. i Dhatrak, P. (2022). A comprehensive study on current and future trends towards the characteristics and enablers of industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, (27), 1-11.
- Lee, I. i Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440.
- Leipzig von, T., Gamp, M., Manz, D., Schöttle, K., Ohlhausen P., Oosthuizen G., ... Leipzig von, K. (2017). Initialising customer-orientated digital transformation in enterprises. *Procedia Manufacturing*, (8), 517-524.
- Lucke, D., Constantinescu, C. i Westkämper, E. (2008). Smart factory – A step towards the next generation of manufacturing. W: M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura (red.), *Manufacturing systems and technologies for the new frontier* (s. 115-118). Londyn: Springer.
- Lummus, R., Krumwiede, D. i Vokurka, R. (2001). The relationship of logistics to supply chain management: Developing a common industry definition. *Industrial Management & Data Systems*, 101(8), 426-432.
- Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S. i Gisario, A., (2019). The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review. *Applied Sciences*, 9(18), 1-34.
- Mychlewicz, C. i Piątek, Z. (2017) *Od Industry 4.0 do smart factory*. Pobrane z <https://publikacje.siemens-info.com/pdf/76/Od%20Industry>
- Nosalska, K., Piątek, Z., Mazurek, G. i Rządca, R. (2019). Industry 4.0: coherent definition framework with technological and organizational interdependencies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 837-862.
- Park, S. (2016). Development of innovative strategies for the Korean manufacturing industry by use of the Connected Smart Factory (CSF). *Procedia Computer Science*, (91), 744-750.
- Prause, M. i Weigand, J. (2016). Industry 4.0 and object-oriented development: incremental and architectural change. *Journal of Technology Management & Innovation*, 11(2), 104-110
- Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M. i Madsen, E. (2014). The smart factory: Exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. *Procedia Engineering*, (69), 1184-1190.
- Ramakrishna, S., Khong, T. i Leong, T. (2017). Smart manufacturing. *Procedia Manufacturing*, (12), 128-131.
- Sandengen, O., Estensen, L., Rodseth, H. i Schjolberg, P. (2016). High performance manufacturing – an innovative contribution towards industry 4.0. *Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, (24), 14-20.
- Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L. i Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607-617.
- Shimamura Fagle, T. i Timper, D. (2021). *A feasibility study of Digital Twin for additive manufacturing: From the perspective of resource efficiency, smaller companies, and the future of industry*. Pobrane z <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-299539>
- Sjödin, D., Parida, V., Leksell, M. i Petrovic, A. (2018). Smart factory implementation and process innovation: A preliminary maturity model for leveraging digitalization in manufacturing moving to smart factories presents specific challenges that can be addressed through a structured approach focused on people, processes, and technologies. *Research-Technology Management*, 61(5), 22-31.
- Szabo, N. (1997) Formalizing and securing relationships on public networks. *First Monday*, 2(9). Pobrane z <https://firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/download/548/469>
- Tupa, J., Simota, J., Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, (11), 1223-1230.
- Wang, S., Wan, J., Li, D. i Liu, C. (2018). Knowledge reasoning with semantic data for real-time data processing in smart factory. *Sensors*, 18(2), 1-10.

- Wang, S., Wan, J., Li, D. i Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 311-320.
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D. i Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, (101), 158-168.
- Westkämper, E. (2008). *Manufuture and sustainable manufacturing*. W: M. Mitsubishi, K. Ueda, F. Kimura (red.), *Manufacturing systems and technologies for the new frontier* (s. 11-14). Londyn: Springer.
- Winkelhaus, S. i Grosse, E. (2020). Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, 58(1), 18-43.
- Yoon, J., Shin, S. i Suh, S. (2012). A conceptual framework for the ubiquitous factory. *International Journal of Production Research*, 50(8), 2174-2189.
- Zhang, S., He, K., Cabrera, D., Li, C., Bai, Y. i Long J. (2019). Transmission condition monitoring of 3D printers based on the echo state network. *Applied Sciences*, 9(15), 1-12.
- Zuehlke, D. (2010). SmartFactory – Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 129-138.

Selected Practical Aspects of Implementing Industry 4.0

Abstract: With many companies implementing the idea of Industry 4.0, the topic of the fourth industrial revolution continues to be explored for new opportunities to implement it in their own production facilities. Nowadays, there is a trend towards the use of additive manufacturing technology, with which the opportunities for other technological innovations for the development of smart factories are expanding. This process is supported by increasing industrialisation, informatisation and digitalisation, the implementation of vertical and horizontal integration across entire factories, and the focus on reconfiguring production lines towards smart manufacturing. This article aims to identify new solutions for companies specialising in manufacturing using 3D printing, creating opportunities for further development in the spirit of the fourth industrial revolution, also pointing out their benefits and potential risks.

Keywords: Industry 4.0, Smart Factory, horizontal integration, vertical integration, Logistics 4.0.