



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Dyscyplina Naukowa

Inżynieria Mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Mateusz Przytuła

Metodyka automatyzacji procesu wytwarzania
przyrostowego MEX z zastosowaniem infrastruktury
sieciowej

Promotor:

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

Promotor pomocniczy:

dr inż. Andrzej Paszkiewicz

Rzeszów 2023

Praca obejmowała swoim zakresem badania realizowane w ramach zadania nr 1 pn. „Rozwój technologii dla potrzeb przemysłu lotniczego z uwzględnieniem uwarunkowań koncepcji Przemysł 4.0” w projekcie badawczym pn. „Regionalne Centrum Doskonałości Automatyki i Robotyki, Informatyki, Elektrotechniki, Elektroniki oraz Telekomunikacji Politechniki Rzeszowskiej”. Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2023 nr projektu 027/RID/2018/19 kwota finansowania 11 999 900 zł.

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I AKRONIMÓW	9
1. WSTĘP	11
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA.....	13
2.1. Metody przyrostowe	13
2.1.1. Wytłaczanie warstwowe materiału.....	13
2.1.2. Fotopolimeryzacja objętościowa.....	15
2.1.3. Selektywne spajanie sproszkowanego materiału	17
2.1.4. Ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału	18
2.1.5. Warstwowy nadruk płynnego materiału	18
2.1.6. Spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem.....	19
2.1.7. Laminacja warstwowa przekrojów.....	20
2.2. Drukarki 3D w strukturach sieciowym.....	21
2.2.1. Platformy chmurowe	22
2.2.2. Serwery wydruku	26
2.3. Monitorowanie procesu druku 3D.....	29
2.4. Przegląd istniejących zautomatyzowanych systemów druku 3D	32
2.4.1. Farma drukarek 3D PrusaResearch	32
2.4.2. Stratasys Continuous Build 3D Demonstrator	34
2.4.3. Figure 4 Production.....	35
2.4.4. 3DQue	36
2.4.5. Ford	37
2.4.6. Evco Plastics	38
2.4.7. Voodoo i projekt Skywalker	39
2.4.8. Formlabs Form Cell	41
2.4.9. MosaicArray.....	41
3. TEZA CEL I ZAKRES PRACY	43

4.	METODYKA I APARATURA BADAWCZA	45
4.1.	Analiza parku maszynowego i wybór technologii	45
4.2.	Integracja sieciowa drukarek 3D.....	47
4.3.	Mechanizm kontroli ilości i typu dostępnego materiału	49
4.4.	Monitoring wizyjny procesu wytwarzania.....	54
4.5.	Transport wyrobów z zastosowaniem robota współpracującego.....	60
4.6.	Metodyka automatyzacji	64
4.7.	Stanowisko badawcze	67
4.7.1.	Koncepcja –zgłoszenie patentowe	67
4.7.2.	Budowa stanowiska	68
4.7.3.	Aplikacja nadzoru procesu druku 3D	71
5.	BADANIA WPŁYWU AUTOMATYZACJI.....	75
5.1.	Metodyka prowadzenia badań	75
5.1.1.	Opis przebiegu procesu wytwarzania w trybie konwencjonalnym	75
5.1.2.	Opis przebiegu procesu w trybie z pierwszym stopniem automatyzacji....	82
5.1.3.	Opis przebiegu procesu w trybie z drugim stopniem automatyzacji.....	88
5.2.	Prezentacja obiektów wykorzystanych do badań.....	92
5.2.1.	Koło zębate KZ-1	92
5.2.2.	Korpus przekładni.....	93
5.2.3.	Koło zębate KZ-2	94
5.3.	Analiza kosztów pracy parku maszynowego	95
5.3.1.	Wytwarzanie w trybie konwencjonalnym	95
5.3.2.	Wytwarzanie w trybie z pierwszym stopniem automatyzacji	97
5.3.3.	Wytwarzanie w trybie z drugim stopniem automatyzacji	99
5.4.	Symulacja procesu wytwarzania	104
5.4.1.	Koło zębate KZ-1, partia 500 sztuk, struktura 12 drukarek 3D.....	104
5.4.2.	Korpus przekładni, partia 500 sztuk, struktura 6 drukarek 3D.....	110

5.4.3.	Koło zębate KZ-2, partia 500 sztuk, struktura 2 drukarek 3D	117
5.5.	Przedstawienie wyników	123
5.5.1.	Koło zębate KZ-1	123
5.5.2.	Korpus przekładni	133
5.5.3.	Koło zębate KZ-2	143
6.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	151
7.	BIBLIOGRAFIA	155
	STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	169
	ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION	171

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I AKRONIMÓW

ABS – Akrylonitryl-Butadien-Styren

ASA – Akrylonitryl-Styren-Akrylan

AM – Additive Manufacturing (wytwarzanie przyrostowe)

API – Application Programming Interface (interfejs programowania aplikacji)

BJT – Binder Jetting (spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem)

CAD – Computer Aided Design (komputerowe wspomaganie projektowania)

DED – Direct Energy Deposition (ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału)

DLP – Digital Light Processing (utwardzanie żywic światłem UV)

FDM – Fused Deposition Modeling (modelowanie tworzywem termoplastycznym)

FFF – Fused Filament Fabrication (przetwarzanie topionego włókna)

HTTP – Hypertext Transfer Protocol (protokół przesyłania hipertekstu)

LAN – Local Area Network (lokalna sieć komputerowa)

MEX – Material Extrusion (wyłaczanie warstwowe materiału)

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (protokół komunikacyjny oparty o wzorzec publikacja/subskrypcja)

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture (protokół komunikacyjny opracowany w celu ujednoczenia komunikacji między maszynami)

PBF – Powder Bed Fusion (selektywne spajanie sproszkowanego materiału)

RFID – Radio-Frequency Identification (technologia identyfikacji radiowej)

RP – Rapid Prototyping (szybkie prototypowanie)

SD – Secure Digital (standard kart pamięci)

SHL – Sheet Lamination (laminacja warstwowa przekrojów)

SLA – Stereolithography (stereolitografia)

SLS – Selective Laser Sintering (spajanie proszku dostarczoną energią)

STL – Stereolithography Language (stereolitograficzny format plików)

USB – Universal Serial Bus (uniwersalna magistrala szeregową)

VAARP – Variable Adhesion for Automated Part Release (technologia zmiennej adhezji)

VPP – VAT Photopolymerization (fotopolimeryzacja objętościowa)

1. WSTĘP

Wytwarzanie przyrostowe stanowi alternatywę w stosunku do tradycyjnej obróbki ubytkowej. Jego istotą jest jednak wytwarzanie elementów poprzez nakładanie kolejnych warstw materiału. Materiałem produkcyjnym zazwyczaj jest tworzywo termoplastyczne lub metal [1], lecz coraz częściej zastosowanie mają również materiały ceramiczne [2], beton [3], szkło [4] oraz materiały kompozytowe [5]. Osobne grupy tworzą materiały typu „smart” cechujące się zdolnością do zmiany geometrii i innych właściwości pod wpływem czynników zewnętrznych oraz stopy z tzw. pamięcią kształtu.

Zastosowanie technik wytwarzania przyrostowego niesie z sobą pewne korzyści w stosunku do obróbki ubytkowej. Podstawową zaletą jest możliwość wytwarzania podzespołów o skomplikowanej geometrii zawierającej wewnętrzne kanały, ukryte elementy i cienkie ścianki. Ponadto możliwa jest konsolidacja większej liczby wytwarzanych komponentów składowych w ramach jednego procesu wytwórczego. Redukuje to czas i koszty związane z montażem oraz liczbę punktów potencjalnych awarii a także podnosi wytrzymałość produkowanych elementów [6]. Proces wytwarzania przeprowadzany jest na jednym stanowisku, bez konieczności wymiany narzędzi czy przenoszenia półfabrykatów pomiędzy kolejnymi stacjami roboczymi. Proces najczęściej przebiega bez udziału operatora – jego obecność podczas wytwarzania wymagana jest jedynie w celu monitorowania poprawności przebiegu i wykonania ewentualnych działań w momencie wystąpienia anomalii lub awarii. Ponadto wytwarzanie przyrostowe wiąże się z powstawaniem znacznie mniejszej ilości materiału odpadowego w stosunku do technik ubytkowych.

Wytwarzanie przyrostowe popularnie zwane drukiem 3D stało się jednym z symboli Czwartej Rewolucji Przemysłowej [7], [8]. Umożliwia ono elastyczną produkcję jednostkową i małoseryjną wyrobów personalizowanych. Do rozpoczęcia wytwarzania nie jest wymagane opracowanie obszernej dokumentacji technologicznej czy projektowanie i wytwarzanie specjalistycznego osprzętu. Wystarczy jedynie wirtualny model 3D zawierający geometrię elementu. Po krótkiej konfiguracji parametrów procesu geometria ta przetwarzana jest na dane numeryczne poszczególnych warstw wydruku przez tzw. oprogramowanie krojące. Rozpoczęcie wytwarzania możliwe jest natychmiast po przeniesieniu pliku produkcyjnego i uzbrojeniu maszyny w odpowiedni materiał [9].

Charakter druku 3D sprawił, że ten stał się powszechnie wykorzystywany w obszarze technik RP (Rapid Prototyping). Wykonywanie prototypów techniką wytwarzania przyrostowego pozwala na szybkie przeprowadzenie testów funkcjonalnych i analiz

inżynierskich przed wprowadzeniem produktu do produkcji seryjnej. Innym typowym miejscem zastosowania technik wytwarzania przyrostowego są działy utrzymania ruchu, gdzie maszyny do druku 3D wykorzystywane są w celu wykonywania części zamiennych nieprodukowanych już przez pierwotnych producentów. Ponadto techniki te pozwalają na wytworzenie części zamiennych i specjalistycznych narzędzi na miejscu. Ma to szczególne znaczenie w kontekście trudności logistycznych takich jak zerwane łańcuchy dostaw, długi czas oczekiwania lub brak możliwości dostarczenia wyrobu (platformy wiertnicze, stacje kosmiczne [10], [11] lub daleko położone stacje badawcze).

Wytwarzanie technikami przyrostowymi wiąże się z koniecznością wykonywania z udziałem człowieka czynności przed i poprocesowych związanych z przygotowaniem urządzenia i obróbką wykończeniową detalu. Z tego względu, w przypadku produkcji wielkoseryjnej, bardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest stosowanie tradycyjnych metod wytwarzania, np. wtrysku materiału. Jednym ze sposobów obniżenia kosztów produkcji technikami addytywnymi może być zautomatyzowanie procesu umożliwiające jego prowadzenie w trybie ciągłym.

Automatyzacja procesów wytwarzania przyrostowego może również przenieść druk 3D w erę Przemysłu 5.0, gdzie jednym z głównym założeń jest postawienie człowieka i jego potrzeb w centrum procesu technologicznego [12]. Wykorzystanie sztucznej inteligencji do monitorowania przebiegu procesu może znacznie zredukować czas pracy operatora. Dodatkowo wprowadzenie robotów współpracujących, może spowodować, że fizyczna obecność operatora przy stanowisku produkcyjnym wymagana będzie jedynie w celu jego uzbrojenia i przygotowania maszyn do procesu, a dalsze czynności wykonywane będą w trybie zdalnym.

Obecne trendy w dziedzinie rozwoju druku 3D pokazują, że w ostatnim czasie temat automatyzacji procesów wytwarzania przyrostowego stał się bardzo popularny. Producenci maszyn do druku 3D prezentują zarówno prototypy jak i seryjne rozwiązania skalowalnych systemów produkcyjnych. Są to jednak rozwiązania dedykowane dla konkretnych urządzeń danego producenta. Obecnie zarówno w sprzedaży na rynku jak i na wyposażeniu wielu firm jest spora ilość drukarek 3D o bardzo dobrych parametrach wytwórczych nie posiadających jednak znamion systemów zautomatyzowanych. Zasadnym zatem jest opracować metodykę integracji takich maszyn w połączone sieciowo, zautomatyzowane zespoły produkcyjne. Zagadnieniom związanym z tym poświęcona została niniejsza rozprawa.

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

2.1. Metody przyrostowe

2.1.1. Wytłaczanie warstwowe materiału

Metoda wytłaczania warstwowego MEX (Material Extrusion) polega na wytłaczaniu przetopionego materiału. Materiał ten, nazywany filamentem, występuje najczęściej w formie nitki nawiniętej na szpulę. Standardowe średnice filamentu to 1,75 oraz 2,85 mm. Proces wytłaczania odbywa się w głowicy, w skład której wchodzi m.in. ekstruder i dysza. Materiał dostarczany jest do bloku grzejnego, tam zostaje uplastyczniony a następnie przetłoczony przez dyszę [13]. Drugą funkcją głowicy jest retrakcja, czyli wycofanie materiału w celu zapobiegania wyciekaniu materiału w trakcie jałowych ruchów głowicy. Drukarka pracująca w oparciu o tę metodę posiada najczęściej jedną lub dwie głowice. Dwie głowice mają zastosowanie np. w przypadku drukowania konstrukcji podporowych z materiału innego niż główny materiał budulcowy. W zależności od sposobu przemieszczania się głowic drukujących można wyróżnić następujące konstrukcje: kartezyjską, delta, polar lub wykorzystującą ramię robota [14]. W trzech pierwszych przypadkach możliwe jest nanoszenie płaskich warstw materiału na wypoziomowanej platformie roboczej. Konstrukcje oparte o ramię robota pozwalają budować zakrzywione warstwy, eliminując przy tym konieczność stosowania konstrukcji podporowych [15]. Dodatkowo, w rozwiązaniach tego typu, platforma robocza umieszczona może być na zrobotyzowanym stole o trzech osiach swobody [16]. Istnieją również rozwiązania, w których nad jednym wydrukiem pracuje równoległe kilka robotów, skracając przy tym czas wydruku pojedynczego modelu [17]. Występują ponadto systemy, w których zintegrowane ze sobą roboty drukujące poruszają się na mobilnych platformach lub zostają podwieszane do latających dronów [18], [19].

Ze względu na relatywnie niską cenę oraz prostotę obsługi drukarek opartych o proces MEX, są one bardzo powszechnie wykorzystywane przez amatorów druku 3D jak również profesjonalne firmy do małoseryjnej, personalizowanej produkcji. Kluczowym zagadnieniem, w celu zapewnienia możliwości ciągłego wytwarzania przy wykorzystaniu drukarek 3D tego typu, jest problem automatycznego usuwania wydrukowanych modeli z przestrzeni roboczej urządzenia.

Jedną z metod rozwiązań tego problemu przedstawiono w pracy dotyczącej zrobotyzowanego manipulatora o wymiennych palcach za pomocą, którego wydrukowane modele przenoszone są poza przestrzeń roboczą drukarki [20]. Autorzy tej pracy przedstawili

wyniki badań nad działaniem pięciu kompletów palców chwytaka o odmiennych, autorskich konstrukcjach. Badano również różne ruchy chwytaka w celu oderwania modelu od platformy roboczej (podnoszenie do góry oraz obroty wokół poszczególnych osi). Opracowana metoda uwzględniała automatyczną detekcję położenia modeli w stosunku do platformy roboczej drukarki na podstawie analizy pliku produkcyjnego. Na jej podstawie wyznaczana była pozycja, do której robot powinien przemieścić chwytak następnie zacisnąć palce i wykonać odpowiedni ruch odrywający model. Metodę tę można rozszerzyć poprzez zastosowanie systemu wizyjnego [21]. Określenie ilości modeli, ich wymiarów oraz położenia środka ciężkości odbywa się poprzez analizę pliku produkcyjnego. Jednak, jak podkreślają autorzy, przedstawiona metoda nie zawsze może być zastosowana. Dotyczy to przypadków, gdy wymiary modelu są zbyt duże lub zbyt małe aby można było uchwycić go za pomocą chwytaka. Co więcej, obiekt musi również być wyższy niż 20 mm, gdyż w przeciwnym wypadku istnieje możliwość uszkodzenia platformy roboczej drukarki przez chwytak. Dodatkowo, usuwany obiekt nie może być zasłonięty przez inny model, którego nie można usunąć z powodu podanych wcześniej przyczyn. Jako zalety zaprezentowanego rozwiązania podkreślona została możliwość zaimplementowania metody w istniejących już farmach drukarek wykorzystujących technologię wytłaczania, bez konieczności bezpośredniej ingerencji w ich konstrukcję.

Odmierna koncepcja zakłada zastosowanie ruchomego ostrza [22]. Po zakończonym wydruku ostrze porusza się nad powierzchnią platformy roboczej za pomocą dwóch napędów śrubowych wprowadzanych w ruch przez silniki krokowe. Przy pomocy ostrza model odcinany jest od platformy. Następnie ramię, na którym zamontowane jest ostrze, zsuwa model z platformy roboczej. Proces odcinania modelu od platformy wywołany może być ręcznie przez operatora lub automatycznie poprzez wcześniejsze dopisanie odpowiednich komend do pliku produkcyjnego.

Innym rozwiązaniem problemu jest zastosowanie stołu roboczego w postaci pasa transmisyjnego [23]. Pas rozciągnięty jest pomiędzy dwiema rolkami, z których jedna napędzana jest silnikiem krokowym. Posuw pasa odpowiada w trakcie wydruku za ruch platformy w osi Y. Po jego zakończeniu silnik przesuw pas, aż do momentu gdy model zostanie wysunięty z przestrzeni roboczej drukarki i samoczynnie zostanie oderwany od pasa. Podobne rozwiązania stosowane są w innych komercyjnych konstrukcjach jak np. Blackbelt3D. Urządzenia tego typu najczęściej posiadają dodatkowo ramę osi Z pochyloną w stosunku do taśmociągu pod pewnym kątem (np. 45°). Teoretycznie umożliwia to

drukowanie bardzo długich modeli przy zastosowaniu odpowiednich rolkowych stołów odbiorczych.



Rys. 2.1. Drukarka 3D Blackbelt [24]

2.1.2. Fotopolimeryzacja objętościowa

Fotopolimeryzacja jest jedną z pierwszych metod druku 3D. Opracowana została przez Chucka Hulla, a następnie opatentowana w roku 1986 przez firmę 3D Systems [25]. Metoda oparta została o zjawisko fotopolimeryzacji, w trakcie której światło-utwardzalna żywica podlega miejscowemu utwardzeniu pod wpływem światła widzialnego lub wiązki lasera UV. Wydruk z zastosowaniem tej metody polega na naświetlaniu lustra żywicy, w której zanurzona została platforma robocza. Po naświetleniu danej warstwy i obniżeniu platformy, następuje uzupełnienie poziomu żywicy oraz naświetlenie kolejnej warstwy. Po przetworzeniu wszystkich warstw platforma wysuwa się do góry na zewnątrz zbiornika. Proces może odbywać się również w układzie odwrotnym. W tym wypadku zbiornik z żywicą posiada przezroczyste dno, przez które naświetlany zostaje drukowany model. Po naświetleniu danej warstwy platforma robocza przesuwa się do góry. W tej konfiguracji proces wymaga dużo mniejszej ilości żywicy w zbiorniku. W obszarze fotopolimeryzacji wyróżnić można kilka technik druku 3D, różniących się zazwyczaj zastosowanym źródłem utwardzającego światła (SLA, DLP, CDLP/CLIP i 2PL).

W zakresie automatyzacji procesu druku 3D z zastosowaniem metody fotopolimeryzacji, firma FormLabs przedstawiła rozwiązanie w postaci sprzętowej przystawki do drukarek 3D Form 3 o nazwie Form Auto.



Rys. 2.2. Drukarka 3D Form 3 z przystawką Form Auto [26]

Rozwiązanie zostało zaprezentowane na początku 2023 roku. Przystawka umożliwia automatyczne usunięcie wydrukowanego modelu z platformy roboczej wykorzystując przy tym opatentowaną przez firmę technologię. Po zakończonym wydruku siłownik otwiera pomarańczową pokrywę drukarki. Następnie do przestrzeni roboczej drukarki wsuwany zostaje specjalny pojemnik wraz z mechanicznym chwytakiem. Chwytnak odkształca sprężystą platformę poprzez jej ściśnięcie. Dzięki temu model odrywany jest od platformy, a następnie spada do pojemnika. Cały proces rejestrowany jest poprzez wbudowaną kamerę. W końcowym etapie całość zostaje automatycznie wysunięta poza przestrzeń roboczą a modele wysypywane są do zbiorczego kosza odpornego na promieniowanie UV. Tam czekają na dalszą obróbkę poprocesową. Drukarka natomiast jest gotowa do realizacji kolejnego procesu wydruku. Pracą całego zespołu drukarek zarządza oprogramowanie Fleet Control. Umożliwia ono zdalne monitorowanie przebiegu procesu, dodawanie zleceń do kolejki wydruku oraz automatyczne rozdzielanie zadań pomiędzy zintegrowanymi drukarkami. W celu zapewnienia ciągłości produkcji firma opracowała rozwiązanie o nazwie High Volume Resin System. Jest to 5 litrowy zbiornik do przechowywania żywicy wyposażony w mechanizm przepompowania i pomiaru poziomu żywicy z funkcją przesyłania danych do oprogramowania Fleet Control. Dzięki temu rozwiązaniu operator z odpowiednim wyprzedzeniem otrzymuje informację o konieczności uzupełnienia materiału. Firma twierdzi, iż opracowane rozwiązania z zakresu automatyzacji zapewniają trzykrotny wzrost wydajności produkcji przy jednoczesnym zaoszczędzeniu 80% kosztów pracy, a koszt jednostkowy produkcji spada wówczas o 30% [27].

2.1.3. Selektywne spajanie sproszkowanego materiału

Metoda selektywnego spajania sproszkowanego materiału PBF (Powder Bed Fusion) polega na spajaniu sproszkowanego materiału za pomocą wiązki lasera. Proces odbywa się w obrębie złoża proszkowego, stanowiącego przestrzeń roboczą urządzenia. Materiał budulcowy pobierany jest z zasobnika proszku i przy pomocy zgarniacza równo rozprowadzany na powierzchni złoża. Na jego dnie znajduje się platforma robocza, której wysokość obniżana jest wraz z wydrukiem każdej warstwy modelu. Proszek w poszczególnych warstwach utwardzany jest poprzez wiązkę lasera. Podczas tego procesu nadtapiany zostaje również materiał w poprzedniej warstwie. Dzięki temu poszczególne warstwy materiału budulcowego łączą się ze sobą. W procesie druku metodą PBF, jako materiał budulcowy, można wykorzystać zarówno proszki poliamidowe jak i proszki metalowe. W przypadku tych pierwszych, wytwarzany element podpierany jest za pomocą niespojonego proszku. Natomiast w przypadku proszków metalowych należy stosować dodatkowe struktury podpierające, które trzeba usunąć po zakończonym procesie [9].

W ramach post-processingu należy również oczyścić model z resztek luźnego proszku. W chwili obecnej proces odpylania modeli wykonywany jest w dużej mierze ręcznie przez człowieka. Wykorzystywane w tym procesie są zarówno pompy próżniowe, sprężone powietrze, jak i narzędzia ręczne. Przy braku zachowania odpowiednich zasad BHP operator może być narażony na szkodliwe działanie proszku pozostającego w stanie luźnym.

W obszarze automatyzacji tej metody opracowane zostało rozwiązanie do oczyszczania wytworzonych modeli z resztek luźnego proszku [28]. Rozwiązanie bazuje na 6-osiowym robocie przemysłowym i systemie wizyjnym. System wizyjny dokonuje detekcji położenia modeli w pojemniku. Na podstawie tej informacji robot przesuwa ramię i podnosi model przy pomocy chwytaka podciśnieniowego. Model przenoszony jest do komory oczyszczania. Komora ta wyposażona jest w wentylator, otwór z rurą podciśnieniową oraz w nieruchomy pędzel. Robot pociera przedmiot o pędzel przez określony czas, następnie obraca model i czynność powtarza dla drugiej strony modelu. Wytarty proszek wysysany jest poprzez odkurzacz. Następnie obrobiony przedmiot odkładany jest do pojemnika odbiorczego.

Na rynku dostępne są również komercyjne rozwiązania w zakresie oczyszczania przedmiotów z resztek proszku. W obszarze tym specjalizuje się niemiecka firma Solukon [29]. W swojej ofercie posiada dwie rodziny maszyny umożliwiających automatyczne czyszczenie modeli z proszków metalicznych i polimerowych. Maszyny przeznaczone do proszków metalicznych posiadają dwuosiową platformę i zamontowany na niej stół wibracyjny. Ruchy platformy oraz parametry wibracji mogą zostać zaprogramowane przez

operatora i być powtarzane dla całej serii wytworzonych modeli. Ponadto firma, we współpracy z firmą Siemens, opracowała oprogramowanie SPR-Pathfinder. Jest to opatentowane rozwiązanie umożliwiające automatyczne wygenerowanie sekwencji ruchów zapewniających usunięcie luźnego proszku nawet z wewnętrznych kanałów modelu. Proces ten bazuje na modelu CAD wytwarzanego przedmiotu poddanego analizie przepływów drobnego proszku.

Amerykańska firma PostProcess Technologies również pracuje nad rozwiązaniem zagadnienia automatycznego odpylania modeli. Wspólnie z firmą EOS GmbH Electro Optical Systems rozwija technologię VAD (Variable Acoustic Displacement). Technologia pozwala na usuwanie i odzyskiwanie resztek proszków polimerowych przy pomocy fal akustycznych (ciśnieniowych) oraz specjalnego oprogramowania - AUTOMAT3D [30].

2.1.4. Ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału

Metoda ukierunkowanego stapiania dostarczanego materiału DED (Directed Energy Deposition) zdefiniowana została przez normę ISO-ASTM 52900 jako proces wytwarzania przyrostowego, w którym skoncentrowana energia cieplna jest wykorzystywana do łączenia materiałów poprzez ich przetapianie w trakcie osadzania. Energia cieplna dostarczana jest w postaci wiązki lasera, wiązki elektronów lub łuku spawalniczego. Jednocześnie w miejscu koncentracji energii dostarczany jest materiał budulcowy w postaci proszku lub drutu oraz gaz osłonowy chroniący przed zanieczyszczeniami. Wytwarzanie obiektów polega na przetapianiu materiału przy jednoczesnym nadtapianiu poprzedniej warstwy w celu ich zespojenia. Konstrukcja maszyn pracujących w tej technologii często opiera się na głowicy zamontowanej na ramieniu robota przemysłowego oraz obrotowej platformie roboczej. Ze względu na tego typu budowę, w trakcie procesu nie ma potrzeby stosowania konstrukcji podporowych. Metoda charakteryzuje się znacznym podobieństwem do metody napawania i podobnie jak ona, może być wykorzystywana do naprawy części maszyn [31], [32].

2.1.5. Warstwowy nadruk płynnego materiału

Metoda warstwowego nadruku płynnego materiału MJM (Multi Jet Modeling) polega na warstwowym nadruku płynnego materiału oraz zmianie jego stanu skupienia na stały. Metoda umożliwia zastosowanie wielu materiałów o różnych właściwościach, w tym woski i żywice. Metoda należy do niewielu, umożliwiających wytwarzanie wielobarwnych i teksturowanych modeli 3D. Materiały zmieniają stan skupienia w wyniku zastygnięcia lub fotopolimeryzacji. Na początku procesu materiały są lekko podgrzewane w celu osiągnięcia optymalnej lepkości. Wydruk odbywa się na platformie roboczej. Na jej powierzchnię, poprzez głowicę drukującą,

nanoszone są drobne kropelki materiału budulcowego i podporowego. Po naniesieniu jednej warstwy materiału następuje jej utwardzenie poprzez naświetlanie lampami UV przymocowanymi do głowicy drukującej. Następnie platforma robocza obniża się o grubość jednej warstwy, a nowy materiał наносzony jest na poprzednią warstwę, aż do momentu wytworzenia całego modelu. Metoda ta wymaga stosowania konstrukcji podporowych. Do ich budowy wykorzystywany jest oddzielny materiał, najczęściej w postaci żelowej substancji. Konstrukcje te usuwane są na etapie post-processingu za pomocą myjki wysokociśnieniowej, myjki ultradźwiękowej lub kąpieli w specjalnych roztworach o odczynie zasadowym [33].

2.1.6. Spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem

Wytwarzanie addytywne w oparciu o metodę BJT (Binder Jetting) polega na spajaniu materiału w formie proszku płynnym spoiwem. Konstrukcja urządzeń wykorzystujących tę metodę, w pewnym stopniu może przypominać urządzenia do selektywnego spajania sproszkowanego materiału. Również w tym wypadku platforma robocza opuszczana jest w komorze roboczej drukarki po zakończeniu wytwarzania każdej kolejnej warstwy modelu. Podobnie materiał budulcowy pobierany jest z zasobnika proszku i rozprowadzany równomiernie poprzez zgarniacz. Jednak w tym wypadku do łączenia materiału w obrębie danej warstwy, a także do łączenia jej z warstwą poprzednią, wykorzystywane jest płynne spoiwo. Spoiwo to rozprowadzane jest przy pomocy głowicy, której konstrukcja jest bardzo zbliżona do głowicy drukarki atramentowej. W niektórych urządzeniach wykorzystywane są również ogrzewacze, w celu kontroli procesu wiązania spoiwa. Po zakończonym procesie, wydrukowane modele należy odseparować od niezwiązanego proszku. Niektóre spoiwa wymagają jednak wcześniejszej obróbki w celu osiągnięcia wymaganej wytrzymałości (np. suszenie lub utwardzanie chemiczne). Odseparowany proszek można poddać recyklingowi i wykorzystać do kolejnych wydruków. Wśród innych czynności post-processingu wyróżnić można wygrzewanie w wysokiej temperaturze oraz infiltrację żywicami epoksydowymi [34].

W 2018 roku szwedzka firma Digital Metal zaprezentowała koncepcję zautomatyzowanej linii produkcyjnej w oparciu o drukarki 3D DM P2500 pracujące w oparciu o technologię Binder Jetting [35]. Koncepcja ta zakłada wykorzystanie robota przemysłowego, poruszającego się po torze jezdny (rys. 2.3). Zadaniem robota jest przenoszenie platform z wytworzonymi modelami pomiędzy drukarkami 3D a stacją usuwania niezwiązanego proszku. Ponadto zaproponowany system produkcji przewiduje możliwość recyklingu

proszku, dzięki temu cały proces wytwarzania charakteryzuje się małą ilością odpadów i jest bezpieczny dla środowiska.



Rys. 2.3. Koncepcyjna automatyczna linia produkcyjna zaprezentowana przed Digital Metal [35]

Dwa lata później firma Digital Metal zaprezentowała automatyczne urządzenie do odpylania wytworzonych części pod nazwą DPS 1000 [36]. Urządzenie posiada sterowaną numerycznie głowicę z dyszą sprężonego powietrza, za pomocą którego usuwany jest luźny proszek. Trajektoria ruchu głowicy generowana jest automatycznie na podstawie modelu CAD platformy roboczej zawierającej wytworzone modele.

2.1.7. Laminacja warstwowa przekrojów

Laminacja warstwowa przekrojów SHL (Sheet Lamination) jest jedną z pierwszych skomercjalizowanych technik wytwarzania przyrostowego. Wytwarzanie tą metodą polega na laminowaniu arkuszy materiału warstwa po warstwie, przy czym każdy arkusz reprezentuje jedną warstwę przekroju poprzecznego modelu. Grubość warstwy odpowiada grubości arkusza materiału. Proces wytwarzania rozpoczyna się od rozciągnięcia pierwszego arkusza materiału na platformę roboczą i ich połączenia. Materiał zazwyczaj rozwijany jest z rolki, dodatkowo może być dociskany przez wałek w celu lepszego połączenia. W poszczególnych arkuszach wycinany jest kontur odpowiadający kształtowi przekroju poprzecznego modelu w danej warstwie. Przestrzeń poza granicami wytwarzanego modelu przycinana zostaje tworząc wzór trójwymiarowej kostki. Umożliwia to łatwiejsze wyciągnięcie modelu po zakończonym procesie wytwarzania. Do wycinania stosuje się sterowane numerycznie głowice wyposażone w laser CO₂ lub nóż. Natomiast do łączenia poszczególnych warstw wykorzystane mogą być techniki klejenia, procesy łączenia termicznego, zaciskanie lub zgrzewanie ultradźwiękowe. Po przycięciu i połączeniu warstw platforma robocza obniża się

o wysokość jednej warstwy (grubość materiału), a następnie rozwijany jest kolejny arkusz materiału [37].

W zakresie automatyzacji metody przedstawione zostało rozwiązanie wykorzystujące robota przemysłowego firmy KUKA [38]. Robot samoczynnie wykonuje poszczególne etapy procesu: rozciąganie arkuszy materiałów, nacinanie arkuszy wiązką lasera oraz klejenie poszczególnych warstw. Autorzy rozwiązania przeprowadzili eksperyment w ramach, którego wykonano model skrzydła samolotu bezzałogowego zbudowanego jednocześnie z dwóch odmiennych materiałów oraz dodatkowych wstawek w postaci taśmy mylarowej i prętów z włókna węglowego. Zaletą rozwiązania jest możliwość wytwarzania przy jednoczesnym zastosowaniu różnorodnych materiałów oraz umieszczania prefabrykowanych dodatków pomiędzy warstwy materiału.

2.2. Drukarki 3D w strukturach sieciowym

Praca w zautomatyzowanym środowisku wytwórczym wymaga od poszczególnych maszyn produkcyjnych zdolności do komunikacji sieciowej, które w początkowej fazie ewolucji maszyn do druku 3D były mocno ograniczone. Pierwsze urządzenia do druku 3D (SLA1, SLA250 itp.) stanowiły kompleksowe środowisko projektowo – produkcyjne łączące drukarkę 3D oraz komputer PC. Dane, a w zasadzie komendy dotyczące ruchu głowicy i platformy roboczej, wymieniane były pomiędzy nimi drogą przewodową wykorzystując do tego port szeregowy. Kolejna generacja maszyn do druku (np. FDM 2000) wyposażona już była w przewodowe interfejsy sieciowe, pozwalające na wymianę danych w sieciach LAN. Wszystkie te drukarki były dużymi urządzeniami wykorzystywanymi w przemyśle. Dopiero rozwój projektu RepRap oraz stopniowe wygasanie patentów dotyczących technologii druku 3D przyczyniły się do rozwoju budżetowych, desktopowych drukarek 3D [39], [40], [41]. Początkowo wymiana danych pomiędzy komputerem a tego typu drukarkami odbywała się poprzez interfejs USB. Powodowało to konieczność ciągłej pracy komputera na czas trwania procesu wydruku. Niedługo później rozpowszechniła się metoda przenoszenia plików produkcyjnych z komputera do drukarki za pomocą kart pamięci SD (Secure Digital) lub w niektórych przypadkach pamięci flash w postaci przenośnych pendrive'ów. Dopiero w ostatnich latach, dzięki rozwojowi technologii IoT (Internet of Things) oraz w wyniku wprowadzania idei Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwach, producenci urządzeń do druku zaczęli wyposażać drukarki 3D w interfejsy sieciowe (przewodowe i bezprzewodowe). Interfejsy te umożliwiają pracę w strukturach sieciowych oraz integrację z systemami cyberfizycznymi [42]. Wykorzystują przy tym różne protokoły transmisji danych, takie jak np.

MTConnect, OPC UA, MQTT itp. [43], [44], [45], [46], [47], [48]. Coraz częściej też, producenci udostępniają dokumentację interfejsu aplikacji API (Application Programming Interface), pozwalającego na zdalną kontrolę urządzenia i monitorowanie jego parametrów przy pomocy ściśle zdefiniowanych komend.

2.2.1. Platformy chmurowe

Jedną z pierwszych platform chmurowych mającą zastosowanie w obszarze druku 3D dotyczyła procesu ofertowania i przetwarzania zamówień [49]. Jej autorzy podkreślają, że tradycyjny proces przetwarzania zamówień wymaga sporo pracy ręcznej. Natomiast, przedstawione przez nich rozwiązanie umożliwia użytkownikowi utworzenie zapytania ofertowego poprzez formularz dostępny na stronie internetowej z możliwością dołączenia pliku zawierającego geometrię modelu 3D. Następnie wykonywana jest automatyczna analiza geometrii modelu pod kątem objętości, wymiarów oraz powierzchni. Na podstawie wyników analizy, rodzaju wymaganego materiału oraz ilości sztuk wykonywana jest wycena zamówienia. Po akceptacji ceny przez klienta sprawdzane są jeszcze ograniczenia i wytyczne projektowe umożliwiające podjęcie ostatecznej decyzji czy zamówienie może zostać przyjęte do realizacji. Sama platforma posiada jednak dość prostą budowę, a co więcej w jej strukturze nie zostały uwzględnione maszyny do druku 3D.

Rozwój platform chmurowych powiązanych z rozproszonym i personalizowanym wytwarzaniem wyrobów wymusił zmierzenie się z problemami zdalnego monitorowania zasobów fizycznych, kolejkowania wydruków, ofertowania na żądanie, wizualizacji statusu zamówienia, generowania modeli 3D bazując na algorytmach głębokiego uczenia (tworzenie modeli na podstawie zdjęć rzeczywistych obiektów) oraz wyszukiwania dostępnych, podobnych modeli 3D na podstawie przesłanego rysunku [50]. Jedną ze znanych metod kolejkowania i przekierowania zleceń produkcyjnych do dostępnych maszyn w strukturach rozproszonego wytwarzania przyrostowego uwzględnia dane dotyczące zlecenia oraz dostępnych zasobów sprzętowych (dane statyczne i dynamiczne) [51]. Jej autorzy wyszczególnili następujące dane dotyczące zlecenia: dokładność wykonania, chropowatość powierzchni, plastyczność, sprężystość, koszt i czas wykonania. Dane statyczne dotyczące maszyn produkcyjnych to: wykorzystywana technologia, dokładność, objętość robocza, akceptowalne dane wejściowe, materiał możliwy do zastosowania i kolor materiału. Ponadto wyszczególnione zostały dane dynamiczne takie jak: aktualny tryb pracy, częstotliwość występowania awarii oraz typ wykrytej awarii. Autorzy przedstawili wyniki badań nad

algorytmami Kuhna-Munkresa, Kruskala i Prime'a wykorzystanymi do rozwiązania problemu dopasowania zlecenia do maszyn produkcyjnych.

W ostatnich latach pojawiły się prace opisujące struktury i zasady funkcjonowania kompleksowych platform do druku 3D [52]. Jedną z nich prezentuje dwa różne modele chmurowej platformy produkcyjnej druku 3D: podstawowy i zaawansowany. Model podstawowy wyróżnia cztery typy ról użytkowników: dostawca usług druku 3D, zamawiający, dostawca usług logistycznych oraz operator chmury. Interakcje pomiędzy poszczególnymi użytkownikami odbywają się przy pomocy platformy chmurowej. Jej operator odpowiedzialny jest za jej utrzymanie i równolegle pełni rolę pośrednika pomiędzy pozostałymi użytkownikami. Dostawcy usług druku 3D publikują informacje o możliwych do wykonania usługach. Klienci natomiast mają możliwość przeglądania oferowanych usług oraz modeli 3D. Realizacja usługi odbywa się po dokonaniu transakcji i zatwierdzeniu umowy. Informacje o transakcji rejestrowane są przez platformę. Po zakończonym procesie wytwarzania dostawca usług logistycznych dostarcza zamówienie klientowi. Model zaawansowany jest znacznie bardziej złożony. Wyróżnia dwa typy zamawiających: nowicjusza i zaawansowanego. Pierwszy ma możliwość zamawiania wstępnie zdefiniowanych modeli wytwarzanych przez rekomendowane drukarki 3D lub zlecenia zamówienia usługi do dostawców usług projektowych. Zaawansowany użytkownik ma natomiast możliwość stworzenia modelu 3D przy pomocy oprogramowania CAD oraz konfiguracji parametrów druku 3D dla konkretnej drukarki. Wśród dostawców usług druku 3D wyróżnić można natomiast role szczegółowe takie jak: dostawca modeli 3D, dostawca usług projektowania, dostawca maszyn do druku 3D, dostawca materiału oraz dostawca usług tzw. „krojenia” modeli – czyli przygotowania plików produkcyjnych. W wariantcie zaawansowanym drukarki 3D stanowią rozproszoną sieć maszyn będących pod kontrolą platformy chmurowej wykorzystując przy tym model biznesowy typu pay-per-use. Jest to model, w którym klienci płacą za faktyczne wykorzystanie lub zużycie zasobów, a nie za stały abonament lub licencję wieczystą. Klienci obciążani są opłatą jedynie za ilość lub czas korzystania z danej usługi lub produktu. Dzięki temu niepracujące w danej chwili urządzenia mogą być wykorzystywane przez innych użytkowników, co znacznie zwiększa ich efektywność [53]. Architektura platformy w oparciu o model zaawansowany podzielona została na cztery warstwy: adaptera dostępowego, wirtualnej puli zasobów, zarządzania usługami drukowania 3D oraz zestawu narzędzi użytkownika. Dodatkowo w całościowym systemie produkcji wyróżnić należy jeszcze warstwę zasobów fizycznych. Adapter dostępowy jest odpowiedzialny za przyłączenie drukarki do sieci. Jego funkcje to między innymi: komunikacja z jedną lub

wieloma drukarkami 3D, zbieranie informacji procesowych, gromadzenie danych o przebiegu procesu oraz zapewnienie bezpieczeństwa w zakresie dostępu użytkowników.

Znana jest również platforma produkcyjna wykorzystująca rozwiązania z obszarów technologii IoT oraz platform chmurowych [54]. Jej architektura podzielona została na warstwy: użytkowników, aplikacji, zarządzania, wirtualizacji zasobów, bazy danych, bramek IoT oraz maszyn produkcyjnych. W wyniku wirtualizacji maszyn produkcyjnych, platforma chmurowa udostępnia informacje dotyczące możliwości w zakresie wykonania określonych zadań produkcyjnych. Ich wykonalność zależy głównie od dwóch czynników: zdolności produkcyjnej oraz dostępności maszyn. Zdolność produkcyjna jest czynnikiem stosunkowo statycznym, ponieważ jego struktura i funkcje zazwyczaj się nie zmieniają. Natomiast dostępność maszyn zmienia się dynamicznie w zależności od ich rzeczywistego stanu oraz harmonogramu zadań. Dane dotyczące obydwu czynników przesyłane są z maszyn do bazy danych w chmurze poprzez bramki IoT. Autorzy w pracy koncentrują się na przedstawieniu koncepcji bramki IoT. Według niej bramka składa się z czterech modułów: interfejsów wejściowego i wyjściowego, schematu danych oraz modułu transformacji. Moduł interfejsu wejściowego pozwala na komunikację z maszyną poprzez jeden z przemysłowych interfejsów komunikacyjnych (np. OPC UA lub MTConnect) lub dedykowany interfejs API. Dane zaimportowane z maszyny przekształcane są do ustandaryzowanych struktur przez moduł transformacji na podstawie zapisanego wcześniej schematu danych. Moduł eksportu przesyła przekształcone dane wraz ze znacznikiem czasu do bazy danych znajdującej się w chmurze. Moduł ten powinien być wyposażony w narzędzia do obsługi baz danych typu szeregu czasowego (np. InfluxDB API, Ddb+ API, Graphite API lub TSDB API). Autorzy zaprezentowali dwa schematy danych (dla obrabiarki CNC oraz drukarki 3D). Wśród których wyróżnić można parametry określające zdolność produkcyjną oraz dostępność. Jednakże, schematy te nie są ustalone na stałe. Każdy dostawca maszyn produkcyjnych może wybrać parametry, które uważa, że mogą być udostępnione w ramach platformy chmurowej. Działanie takie zapewnia ochronę danych poufnych. Autorzy pracy przedstawili przykład bramki IoT połączonej z drukarką 3D Anycubic. W tym przypadku jako platformę sprzętową wykorzystano układ Raspberry Pi z zainstalowanym serwerem wydruku OctoPrint. Oprogramowanie pobiera dane z OctoPrint, następnie przekształca je do formatu kompatybilnego z bazą danych, do której trafiają finalnie w postaci ustandaryzowanej.

W ostatnich latach zauważyć można również znaczny rozwój komercyjnych platform chmurowych skoncentrowanych wokół druku 3D. Jest to naturalny trend związany z koncepcją Przemysłu 4.0 oraz wdrażaniem jej założeń w przedsiębiorstwach. Platformy te

umożliwiają integrację wielu maszyn wytwórczych w ramach wspólnego środowiska heterogenicznego. Integracja drukarek 3D z platformą chmurową odbywa się w kilku trybach. Najczęściej wykorzystywana jest specjalnie opracowana wtyczka programowa umożliwiająca komunikację z zewnętrznym serwerem wydruku. W niektórych przypadkach wykorzystywany jest interfejs API (Application Programming Interface) danej drukarki. Zdarzają się również przypadki, gdy oprogramowanie drukarki zostaje fabrycznie wyposażone w funkcjonalność umożliwiającą połączenie jej z konkretną platformą aplikacyjną. Dostęp do środowiska aplikacyjnego zapewniany jest najczęściej poprzez przeglądarkę internetową. Pojawiają się również rozwiązania zapewniające dostęp poprzez aplikację mobilną. Powszechną funkcjonalnością tego typu platform jest możliwość zdalnej kontroli wydruku, kolejkowania zadań, monitoringu wizyjnego procesu, przygotowywania plików produkcyjnych oraz przechowywania ich w przestrzeni chmurowej. Ponadto niektóre z nich oferują możliwość detekcji defektów wydruku w czasie rzeczywistych lub możliwość monitorowania stanu filamentu. Porównanie wybranych platform chmurowych umożliwiających wydruk 3D przedstawione zostało w [tab. 2.1](#) ~~tab. 2.1~~.

Tab. 2.1. Porównanie wybranych platform chmurowych do druku 3D

Platforma	3DPrinterOS	Polar Coud	Cloud3DPrint	Astroprint	SimplyPrint
Typy licencji	Darmowy okres próbny, Enterprise, Education	Basic, Polar, School	Free, Essential, AI Pro, Business	Basic, Premium, Business, Education	Free, Basic, Pro, Print farm
Kompatybilne drukarki 3D	Ponad 130 modeli zarządzanych bezpośrednio	Fabrycznie kompatybilne (urządzenia FlashForge, Dremel, Sindoh) lub wyposażone w serwer wydruku	Ponad 100 modeli drukarek FDM	Urządzenia z oprogramowaniem wbudowanym Marlin, Sailfish, Repetier	Ponad 370 urządzeń
Sposób przyłączenia drukarki 3D	Klient Raspberry Pi lub PC (Windows,	Bezpośrednio za pomocą nazwy użytkownika	Klient Raspberry Pi	Astrobox Touch, Astrobox Gateway,	Wtyczka Octoprint

	Ubuntu), Klucz API	i pinu, poprzez wtyczkę Octoprint		WtyczkaOcto print	
Zdalny monitoring	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Detekcja defektów	Nie	Nie	Tak (AEye)	Nie	Nie
Krojenie w chmurze	Tak	Tak (CANVAS Slicer)	Tak (Cura, Superslicer)	Tak (Cura, Slic3r)	Tak
Zarządzanie filamentem	Nie	Nie	Nie	Nie	Tak
Pamięć masowa	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak

2.2.2. Serwery wydruku

Z przeprowadzonej w poprzednim podrozdziale analizy wynika, że często pojawia się potrzeba stosowania specjalnych adapterów w celu integracji maszyn do druku 3D z systemami cyber-fizycznymi lub platformami chmurowymi. W przypadku, gdy producent wyposażył drukarkę 3D w interfejs aplikacji, najczęściej wystarczy jedynie jego zaimplementowanie po stronie systemu informatycznego. Obecnie jednak, na rynku dostępnych jest wiele budżetowych, a jednocześnie bardzo dobrych drukarek 3D, które nie zostały standardowo wyposażone w interfejsy sieciowe. Część z nich można jednak zintegrować z zewnętrznym serwerem wydruku. Elementem warunkującym możliwość zastosowania danego serwera wydruku jest jego zgodność z wbudowanym oprogramowaniem drukarki 3D.

Serwery te instaluje się zazwyczaj na niewielkich komputerach jedнопłytkowych (Raspberry Pi, BeagleBone, Banana Pi itp.) [55], [56]. Są to urządzenia wielkości karty kredytowej, oferujące jednocześnie funkcjonalność porównywalną do komputerów klasy PC. Posiadają wbudowane interfejsy sieciowe, interfejsy USB, możliwość podłączenia monitora, kamery lub zewnętrznego dysku twardego. Przy czym sam system operacyjny instalowany jest zazwyczaj na karcie SD. Komputery te jednocześnie charakteryzują się niskim poborem energii. Niezwykle istotną funkcjonalnością, w kontekście zastosowań w obszarze IoT, jest

dostępność cyfrowych portów wejścia/wyjścia oraz niskopoziomowych magistral komunikacyjnych (UART, SPI, I2C itp.) [57]. Stwarza to możliwość integracji szerokiej gamy czujników oraz elementów wykonawczych takich jak przełączniki, serwomechanizmy czy silniki krokowe [58]. Fizyczne połączenie serwera i drukarki 3D odbywa się zazwyczaj za pośrednictwem interfejsu USB.

Oprogramowanie typu serwer wydruku niemal zawsze zawiera interfejs graficzny użytkownika. Najczęściej dostępny jest on w postaci serwisu internetowego dostępnego z poziomu przeglądarki lub aplikacji mobilnej. Interfejsy poszczególnych aplikacji posiadają wiele wspólnych funkcjonalności. Zwykle jest to transfer plików do serwera wydruku, kontrola procesu poprzez jego uruchomienie i zatrzymanie, odczyt podstawowych parametrów maszyny (temperatury stołu, komory roboczej i ekstrudera) oraz odczyt parametrów procesu (czas trwania, prognozowany czas do zakończenia i ukończenie wyrażone w procentach). Dodatkowo dosyć często możliwy jest podgląd obrazu w czasie rzeczywistym z kamery umieszczonej wewnątrz komory roboczej drukarki. Pozwala to na zdalną kontrolę wzrokową poprawności przebiegu procesu wydruku, możliwość wczesnego wychwycenia błędów oraz odpowiedniej reakcji w razie ich wystąpienia. Jest to cecha szczególnie istotna w przypadku posiadania większej ilości maszyn drukujących umieszczonych w różnych lokalizacjach.

Ponadto część serwerów udostępnia użytkownikowi mechanizmy obsługi zdarzeń. Pełni on szczególnie istotną rolę w procesach integracji maszyn w strukturach sieciowych. Mechanizm ten pozwala na wykonanie zaprogramowanych wcześniej skryptów po wystąpieniu określonych okoliczności, np. po zakończeniu wydruku. W tym zakresie najbardziej rozbudowane zostało oprogramowanie Octoprint, gdzie owe zdarzenia podzielone zostały na poszczególne grupy – najważniejsze z nich dotyczą serwera wydruku, komunikacji z drukarką, obsługi plików, procesu wydruku i przetwarzania komend G-Code. Niemal każde wygenerowanie zdarzenia zawiera dodatkowe informacje (ang. payload). Informacje te mogą być wykorzystane przez programistę lub architekta systemu informatycznego. Przytoczyć można tutaj przykład zdarzenia generowanego w momencie zakończenia procesu wydruku z powodzeniem („PrintDone”). Zdarzenie to dostarcza szereg informacji takich jak np.: nazwa pliku produkcyjnego wraz ze ścieżką dostępu, nazwa użytkownika inicjującego wydruk oraz rzeczywisty czas jego trwania. Dzięki tym informacjom architekt systemu informatycznego może przykładowo zaplanować funkcję powiadamiania użytkownika o zakończonym procesie, automatycznego usuwania pliku z pamięci drukarki lub zbierania informacji odnośnie czasie trwania procesu w zewnętrznej bazie danych.

Drugą funkcjonalnością, która jest również istotna w procesach integracji maszyn, jest interfejs API (ang. Application Programming Interface) [59]. Interfejs ten zarówno umożliwia, jak i określa sposób komunikacji pomiędzy oprogramowaniem drukarki 3D i zewnętrznym systemem informatycznym. Stanowi on zbiór jasno zdefiniowanych reguł odnoszących się do procesów komunikacji. Przykładem oprogramowania posiadającego powszechnie dostępną dokumentację takiego interfejsu może być Octoprint oraz Repetier-Server. Każde z nich wykorzystuje protokół HTTP (Hypertext Transfer Protocol) oraz zawiera mechanizm autoryzacji użytkownika za pomocą klucza API. Oprogramowania w zakresie oferowanych możliwości są bardzo zbliżone do siebie. Pozwalają one na przesyłanie komend sterujących procesem wydruku (rozpoczęcie, anulowanie, wstrzymanie), transfer plików, odpytywanie o stan procesu i samej drukarki, bezpośrednie przesłanie komendy w formacie G-Code oraz przesłanie zapytań o wartości zmiennych procesowych (np. temperatury ekstrudera, komory i stołu roboczego) [60].

Wśród najpopularniejszych serwerów wydruków wyróżnić można takie jak np. OctoPrint, Repetier, MainSail, PrusaLink i Fluid. Tab. 2.2 zawiera zestawienie ich parametrów i funkcjonalności.

Tab. 2.2. Parametry i funkcjonalność wybranych serwerów wydruku

Server wydruku	OctoPrint	RepetierServer	MainSail	PrusaLink	Fluid
Kompatybilny firmware	Marlin, RepRap, Prusa,	Repetier, Marlin, Sprinter, Smoothieware	Klipper	Prusa Firmware	Klipper
Obsługa wielu drukarek	Nie	Tak	Tak	Nie	Tak
Wbudowany slicer	Tak	Nie	Nie	Nie	Nie
Podgląd obrazu z kamery	Tak	Tylko w wersji PRO	Tak	Nie	Tak
Interfejs graficzny	Serwis web	Serwis web	Tak	Tak	Tak
Interfejs API	Tak	Tak	Nie	Tak	Nie
Dostęp z poza sieci LAN	Octoeverywhere	Repetier – server monitor	Nie	Prusa Connect	Nie
Mechanizm zdarzeń	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie
Dodatkowe rozszerzenia	Tak, bardzo rozbudowane repozytorium	Tak, w postaci skryptów LUA	Nie	Nie	Nie

2.3. Monitorowanie procesu druku 3D

Drugim, istotnym aspektem w kontekście automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego jest zdalne monitorowanie jego przebiegu oraz możliwość automatycznej detekcji defektów w trakcie wydruku. Wpływa to zarówno na jakość końcowych wyrobów a także na obniżenie kosztu jednostkowego wytworzenia wyrobu. Wczesna detekcja defektu, jeszcze w trakcie trwającego procesu drukowania, pozwala na podjęcie decyzji o jego anulowaniu. Przyczynia się to do zmniejszenia ilości marnowanego materiału, zużycia energii i czasu produkcji. Mimo iż jeszcze kilka lat temu obecność kamery internetowej w przestrzeni roboczej drukarki 3D była rzadkością to obecnie producenci maszyn do druku 3D coraz częściej wyposażają swoje urządzenia w mechanizmy zdalnej kontroli i monitorowania. Podyktowane jest to szybkim rozwojem IoT, jak również wprowadzaniem koncepcji Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwach.

Przeprowadzona analiza stanu zagadnienia pozwoliła wyróżnić trzy grupy metod monitorowania procesu druku 3D:

- Monitorowanie procesu przez operatora – operator kontroluje przebieg procesu poprzez fizyczną obserwację drukowanego modelu i parametrów maszyny. Na podstawie własnych doświadczeń jest w stanie ocenić prawidłowość przebiegu procesu. Monitorowanie może odbywać się lokalnie lub zdalnie poprzez transmisję parametrów procesu, w tym np. obraz wizyjny z kamery [61], [62].
- Automatyczna diagnostyka maszyny do druku 3D lub określenie jej zdolności do pracy na podstawie danych pochodzących z zainstalowanych sensorów. Bardzo często wykorzystywane są w tym celu algorytmy sztucznej inteligencji [63], [64].
- Automatyczna detekcja defektów wydruku. W przypadku metody ekstruzji warstwowej materiału zazwyczaj stosowane są systemy wizyjne, porównujące obraz drukowanego modelu z wirtualnym modelem wzorcowym [65], [66].

W obszarze automatycznej diagnostyki maszyn do druku 3D pojawiły się opracowania wykorzystujące metody akustyczne. Jedno z nich przedstawia metodę wykrywania nienormalnych stanów pracy drukarki 3D (technologia MEX – FDM) wykorzystując zjawisko emisji akustycznej [63]. Przebieg emisji rejestrowany jest przez czujnik wibracji przymocowany do obudowy ekstrudera. Gdy poziom sygnału przekracza zadany próg wykonywana jest analiza głównych składowych (amplituda, ilość drgań, czas trwania, energia absolutna, siła sygnału, średnia kwadratowa). Wektor tych składowych wykorzystywany jest do identyfikacji stanu drukarki 3D z wykorzystaniem HSMM (Hidden Semi-Markov Model).

Przy pomocy zaprezentowanej metody autorom udało się rozpoznać stany alarmowe w przypadku braku filamentu lub złamania się filamentu w ekstruderze. W innym opracowaniu do badań jako sensor wykorzystany został mikrofon o charakterystyce kardoidalnej skierowany na ekstruder drukarki typu FDM [64]. Przy pomocy sieci neruonowych LSTM (LongShort-Term Memory) [67], [68] próbowano rozróżnić stany takie jak: praca wentylatora, drukowanie, otwieranie drzwi komory, zamykanie drzwi komory, ruch ekstrudera w osi Z oraz nieprawidłową wysokość dyszy nad stołem roboczym. Wyniki badań potwierdzają możliwość zastosowania metody jedynie do detekcji pracy głowicy w osi Z.

Opracowana została również metoda detekcji zablokowania się filamentu [69]. Metoda zakłada wykorzystanie układu Raspberry Pi, oprogramowania OctoPrint oraz zespołu dwóch enkoderów. Nitka filamentu w trakcie wydruku wprawia w ruch wałki enkoderów. Na podstawie ich sygnałów dokonywana jest detekcja zablokowania się materiału w ekstruderze lub jego braku. W takim wypadku komputer zatrzymuje proces drukowania i wysyła zdalnie stosowne powiadomienie do użytkownika. Praca prezentuje również układ tensometryczny do pomiaru ilości (masy) pozostałego filamentu w szpuli. Wartość pomiaru wyświetlana jest na ekranie LCD umieszczonym przy drukarce 3D. Na tej podstawie operator może szybko dokonać oceny czy ilość dostępnego materiału jest wystarczająca do wykonania wydruku. Brak jest informacji na temat udostępnienia mierzonej wartości z poziomu zdalnego interfejsu użytkownika.

Ciekawe rozwiązanie przedstawione zostało w pracy dotyczącej rozwiązań z dziedziny IoT do monitorowania i kontroli procesu wytwarzania przyrostowego [70]. Praca przedstawia znaną już metodę monitorowania stanu drukarki i postępu wydruku za pomocą oprogramowania Repetier z poziomu urządzenia mobilnego. Nowością jest zastosowanie znaczników Bluetooth umieszczonych fizycznie na drukarkach 3D. Odczyt znacznika przez aplikację w telefonie umożliwia automatyczne otwarcie zdalnego interfejsu użytkownika do kontroli danej drukarki.

Automatyczna detekcja defektów dla procesów wytwarzania przyrostowego wykorzystujących metodę wytłaczania warstwowego materiału opiera się głównie na zastosowaniu technik wizyjnych. Znane są tzw. budżetowe metody wizyjne, działające w czasie rzeczywistym [65]. W jednej z nich generowany jest obraz zawierający widok wirtualnego modelu 3D w odpowiedniej fazie wytwarzania, wykonany z kierunku odpowiadającego kierunkowi ustawienia fizycznej kamery w stosunku do platformy roboczej drukarki. Następnie obraz porównywany jest z odpowiednio przetworzonym zdjęciem z kamery. W drugiej metodzie wykorzystywane są dwie kamery. Na podstawie ich obrazów,

generowany jest wirtualny model 3D drukowanego obiektu. Model ten następnie porównywany jest z wygenerowanym wirtualnym modelem 3D drukowanego obiektu w danej fazie wytwarzania. W obu przypadkach różnica charakterystycznych, zdefiniowanych wcześniej, wymiarów przekraczająca zadany próg skutkuje sygnalizacją wykrycia defektu.

Inna metoda automatycznej detekcji defektów wykorzystuje algorytm uczenia maszynowego SVM (Support Vector Machines) [66]. Polega ona na wykonywaniu zdjęć górnej warstwy wydruku w krytycznych momentach. Moment wykonania zdjęcia wyznaczany jest poprzez wcześniejszą analizę geometrii modelu. Przed zrobieniem zdjęcia głowica drukująca automatycznie przesuwana jest tak aby nie zakrywać widoku modelu. Zdjęcia dzielone są na 16 sekcji. Średnie wartości kolorów w poszczególnych sekcjach stanowią dane wejściowe do algorytmu decyzyjnego, klasyfikującego model na „poprawny” lub „wadliwy”. Do poprawnej pracy algorytm potrzebuje zbioru danych uczących. Metoda umożliwia wykrycie defektów w strukturze drukowanego modelu oraz defektów spowodowanych brakiem filamentu lub nieprzewidzianym przerwaniem procesu drukowania.

W ostatnim czasie na rynku pojawiły się rozwiązania bazujące na obrazie z kamery i wykorzystujące algorytmy sztucznej inteligencji do detekcji defektów w trakcie wydruków. Jednym z pierwszych takich rozwiązań, bardzo popularnym wśród domowych użytkowników drukarek 3D, było The Spaghetti Detective. Oprogramowanie zadebiutowało w 2019 roku w postaci dodatku do serwera wydruku Octoprint. Zastosowano w nim algorytmy głębokiego uczenia. Ich zadaniem była ocena stopnia podobieństwa obrazu z kamery monitorującej proces wydruku ze zbiorem obrazów przedstawiających defekty wydruku. Ocena ta była przedstawiana w postaci wskaźnika z kolorową skalą (kolor zielony – wydruk prawidłowy, żółty – średnie prawdopodobieństwo defektu, czerwony – duże prawdopodobieństwo defektu). Dodatkowo dostępna była opcja automatycznego przerwania wydruku w momencie detekcji defektu [71]. Obecnie aplikacja rozszerzona została o dodatkowe funkcje zdalnego monitorowania i nadzoru drukarek 3D i rozpowszechniana jest pod nazwą Obico [72]. Tab. 2.3 zawiera zestawienie podobnych znanych aplikacji wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji do detekcji uszkodzeń wydruku [73], [74].

Tab. 2.3. Porównanie oprogramowania do detekcji defektów w trakcie wydruku

Nazwa oprogramowania	Nexus AI	PrintWatch	Obico (The spaghetti detective)	Gadget	Detector 2
Współpraca z serwerem wydruku	Octoprint	Octoprint	Octoprint, Klipper	Octoprint, Klipper	Octoprint

Miejsce przetwarzania danych	Serwer lokalny	Serwer w chmurze	Serwer w chmurze / serwer lokalny	Serwer w chmurze	Lokalnie (serwer wydruku)
Sterowanie wydrukiem	Brak	Automatyczne stopowanie wydruku, wyłączenie grzałki ekstrudera	Automatyczne stopowanie wydruku, możliwość pełnej kontroli nad drukarką	Automatyczne stopowanie wydruku	Brak
Rodzaj powiadomień	E-mail	E-mail, SMS, Discord, Telegram,	E-mail, SMS, Discord, Slack, Pushover, Pushbullet,	E-mail, SMS, Telegram, Discord, Slack, Pushover, Pushbullet, Windows, Mac, urządzeniami mobilne	E-mail
Regulacja prognozy czułości	Nie	Tak	Nie	Tak	Tak
Mechanizmy integracji	REST API	REST API	REST API	-	-
Opłaty	Brak	9\$ / miesiąc (pierwsza drukarka) + 4\$ / miesiąc (każda kolejna)	Brak dla 1 drukarki, dla większej ilości: 2\$ / drukarka / miesiąc +pakiety godzin detekcji	Brak, wymagana opłata za OctoEverywhere	Brak

2.4. Przegląd istniejących zautomatyzowanych systemów druku 3D

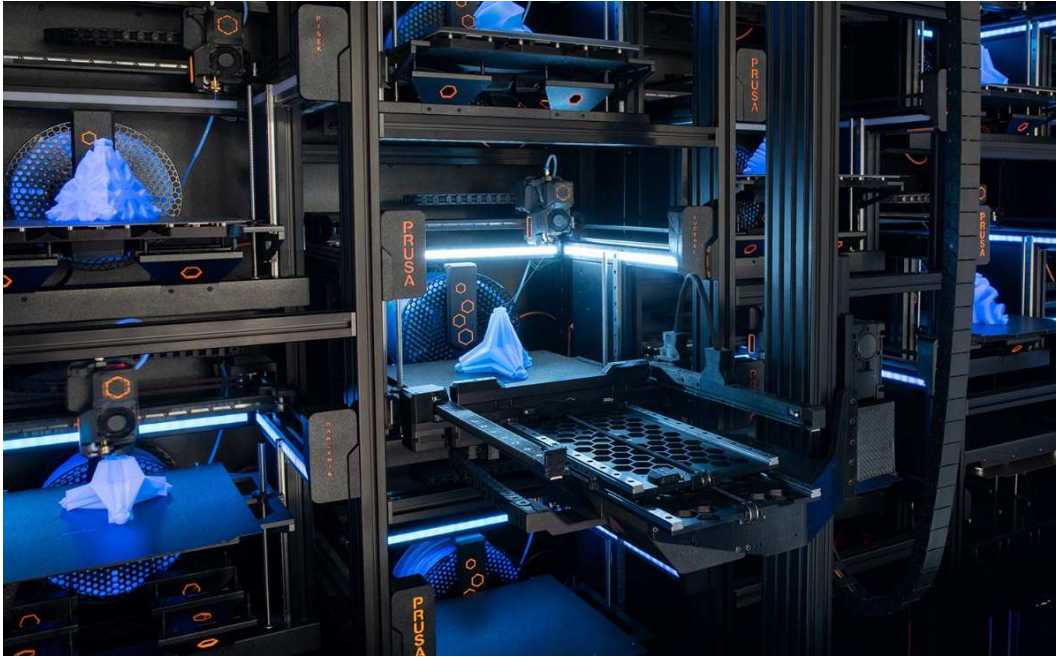
2.4.1. Farma drukarek 3D PrusaResearch

Prusa Research jest bardzo znanym czeskim producentem drukarek 3D wykorzystujących technologie wytłaczania przyrostowego i stereolitografii. Maszyny te charakteryzują się wysokim poziomem niezawodności oraz wysoką jakością drukowanych modeli. Najlepszym dowodem na to jest fakt, iż poszczególne podzespoły z tworzyw sztucznych wykorzystywanych do budowy drukarek wytwarzane są przez drukarki tego właśnie producenta. Całodobowa produkcja odbywa się na ogromnej farmie liczącej ponad 600 maszyn zlokalizowanej w Pradze. Dużym ułatwieniem w zarządzaniu parkiem maszynowym stało się wyposażenie drukarek 3D w interfejsy sieciowe i połączenie ich w jedną wspólną strukturę kontrolowaną zdalnie. Jednak działania takie jak wymiana platform roboczych czy uzupełnianie filamentu wykonywane są ręcznie przez zatrudnionych kilkanaście osób w trybie zmianowym [75].



Rys. 2.4. Farma drukarek "The Farm" w fabryce Prusa [76]

Ta sama firma zaprezentowała podczas targów EXPO 2020 funkcjonalny prototyp cechujący się wysokim stopniem zautomatyzowania pod nazwą „Automated Farm System” W tym wypadku farma składała się z 34 drukarek 3D CoreXYOriginal Prusa, jednak ich liczba w docelowej komórce produkcyjnej jest skalowalna. Drukarki montowane są na specjalnych szynach w szafie na wzór szafy serwerowej. Umożliwia to wymianę lub wyjęcie pojedynczej drukarki w trybie „plug and play”, gdy zachodzi potrzeba przeprowadzenia działań serwisowych. Gotowe wydruki odbierane są z przestrzeni roboczej drukarki wraz z platformą roboczą poprzez zautomatyzowane ramię. Następnie wydruk przenoszony jest do jednostki oddzielającej model od platformy, model spada do jednego z dwóch koszy a pusta platforma przenoszona jest z powrotem do drukarki, gdzie następuje inicjacja kolejnego wydruku. Producent nie udostępnia szczegółów na temat w jakiś sposób modele odrywane są od platformy. Podaje natomiast informację o tym, że w przyszłości doda różne opcje zbierania gotowych części, w tym również rozwiązanie do zdejmowania i przechowywania całych platform dla zachowania ciągu kontroli jakości i identyfikowalności produkowanych części. Poszczególne drukarki wchodzące w skład rozwiązania połączone są sieciowo i nadzorowane poprzez oprogramowanie Prusa Connect - będące jeszcze w fazie rozwoju [77].



Rys. 2.5. Prototyp "Automated Farm System" - Prusa Research [76]

2.4.2. Stratasys Continuous Build 3D Demonstrator

Jednym z pierwszych rozwiązań z zakresu automatyzacji druku 3D było urządzenie o nazwie Continuous Build 3D Demonstrator zaprezentowane przez firmę Stratasys podczas targów RAPID & TCT Show w Pittsburghu w 2017 roku. Urządzenie posiadało skalowalną i modułową konstrukcję. W skład pojedynczego modułu wchodziły trzy drukarki 3D pracujące w technologii wytłaczania materiału. Inżynierowie firmy w dość oryginalny sposób rozwiązyali problem ręcznej wymiany platformy roboczej po zakończonym wydruku, gdyż drukarki nie były wyposażone w klasyczne platformy. Wydruki odbywały się na automatycznie rozwijanej na stole roboczym folii. Po zakończeniu procesu druku fragment folii z wydrukowanym modelem był przesuwany przy pomocy rolek poza przestrzeń roboczą drukarki, gdzie następnie zostawał automatycznie odcinany nożem krążkowym i spadał do kosza umieszczonego przed drukarką. Następny wydruk 3D startował automatycznie na kolejnej naciągniętej na stół roboczy folii. Drukarki kontrolowane były poprzez oprogramowanie zaimplementowane w chmurze. Jego funkcje obejmowały automatyczne zarządzanie kolejkami, równoważenie obciążenia i redundancję architektury. Zadania drukowania były automatycznie kierowane do dowolnej dostępnej komórki drukowania, a jeśli jedna z komórek uległa awarii, zadanie drukowania zostało natychmiast przekierowane do następnej dostępnej komórki [78].



Rys. 2.6. Stratasys Continuous Build 3D Demonstrator [79]

2.4.3. Figure 4 Production

Figure 4 Production (rys. 2.7) jest spersonalizowanym i skalowalnym rozwiązaniem oferowanym przez firmę 3D Systems umożliwiającym automatyczną produkcję wykorzystując technologię fotonimeryzacji. Rozwiązanie składa się z jednostki sterującej, komórek wytwórczych oraz stacji post-processingu. W początkowej fazie rozwojowej platformy robocze z wydrukami przenoszone były pomiędzy kolejnymi stacjami poprzez wieloosiowe roboty przemysłowe. Platforma trzymana przez chwytak robota mogła być dodatkowo poddana procesowi kontroli jakości przez skaner 3D. W rozwiązaniu komercyjnym roboty zastąpione zostały przez mechaniczne ramię przemieszczające się pomiędzy poszczególnymi stacjami na torze jezdnym podwieszonym do górnej części konstrukcji [80].



Rys. 2.7. Figure 4 Production [81]

2.4.4. 3DQue

3DQue jest firmą pochodzącą z Kanady, założoną przez Mateo Pekica. Firma ta specjalizuje się w automatyzacji tanich i prostych drukarek 3D wykorzystujących technologię wytłaczania warstwowego materiału. W swojej ofercie posiada rozwiązania zarówno programowe jak i sprzętowe. Pod koniec 2022 roku firma zaprezentowała Autofarm3D – zestaw narzędzi umożliwiających zdalne monitorowanie i zarządzanie pracą farmy drukarek 3D. Drukarki łączone są bezprzewodowo w jedną strukturę sieciową poprzez specjalny adapter o nazwie Quinly Wireless Hub. Do jednego adaptera można przyłączyć, w zależności od konfiguracji, nawet do trzech drukarek 3D opartych na oprogramowaniu wbudowanym Marlin w wersji 2.0. Na liście zgodnych drukarek można znaleźć znane modele pochodzące od producentów takich jak Artillery 3D, Anycubic, Creality oraz Prusa. Do adaptera możliwe jest również podłączenie kamery z interfejsem USB. Umożliwia to bieżące monitorowanie przebiegu procesu wydruku oraz weryfikację jego poprawności przez oprogramowanie QuinlyVision, które potrafi wykryć w czasie rzeczywistym 14 typów uszkodzeń wydruku [82].



Rys. 2.8. Zautomatyzowana farma drukarek 3D wykorzystujących rozwiązania firmy 3DQue [83]

Aby w pełni zautomatyzować proces wydruku, firma opracowała innowacyjne rozwiązanie w postaci platformy roboczej wykorzystującej technologię VAARP (Variable Adhesion for Automated Part Release). Platforma ta gwarantuje odpowiednio dużą siłę przylegania modelu w trakcie wydruku, gdy stół jest rozgrzany. Siła ta maleje wraz z ostudzeniem stołu po zakończeniu wydruku do takiego stopnia, że wydruki odrywają się od platformy po dotknięciu ich przez ramię drukarki. W tym rozwiązaniu drukarki zamontowane

są pod kątem około 30 – 40° do poziomu, dzięki czemu wydruki spadają do zamontowanego przed drukarką pojemnika. Po usunięciu modelu stół pozostaje czysty, a drukarka gotowa jest do realizacji kolejnego procesu. W celu zwiększenia efektywności firma oferuje w sprzedaży wentylatory do szybszego ochładzania stołu roboczego [84].

2.4.5. Ford

Kolejnym przykładem automatyzacji procesu druku 3D jest system opracowany i wdrożony do pracy przez inżynierów firmy Ford. W jego skład wchodzi drukarka 3D Carbon oraz autonomiczny robot mobilny firmy KUKA. Elementy zostały zintegrowane poprzez opracowanie specjalnego interfejsu komunikacyjnego umożliwiającego ciągłą wymianę danych i informacji wewnątrz systemu. Dzięki temu drukarki mogą informować robota o planowanym czasie ukończenia procesu wydruku. Następnie robot podjeżdża do odpowiedniej drukarki i sygnalizuje gotowość do odebrania produktu z komory roboczej. Atutem zastosowania autonomicznego robota jest fakt, iż może on pracować przez całą dobę z wyłączeniem przerw potrzebnych na doładowanie akumulatorów. Firma wykorzystuje system do produkcji niskonakładowych i niestandardowych podzespołów. Jej pracownicy natomiast podkreślają zalety zastosowania robota i chwalą go za jego punktualność oraz precyzję działania [85].



Rys. 2.9. Współpraca autonomicznego robota mobilnego z drukarką 3D w firmie Ford [86]

2.4.6. Evco Plastics

Evco Plastics to firma pochodząca ze Stanów Zjednoczonych, która od wielu lat zajmuje się przetwórstwem tworzyw sztucznych. Firma posiada w ofercie usługi projektowania, wykonywania form wtryskowych oraz wytwarzania podzespołów dla różnych gałęzi przemysłu. Jej pracownicy posiadają również bogate doświadczenie w zakresie automatyzacji procesów wytwarzania. Na wyposażeniu parku maszynowego firmy znajduje się 6 drukarek 3D Markforged MarkTwo pracujących w technologii FDM. Początkowo drukarki wykorzystywane były do produkcji specjalistycznych uchwytów inspekcyjnych na potrzeby wewnętrzne własnego laboratorium metrologicznego. Jednak z czasem ich zastosowanie rosło, szczególnie w zakresie wytwarzania niewielkich, pojedynczych lub małoseryjnych podzespołów. Aby jednak wytwarzanie stało się efektywne opracowany został autonomiczny system wymiany platform roboczych. System bazuje na robocie firmy Universal Robots. Ramię robota obsługuje 6 drukarek 3D w zakresie rozładowania zadrukowanych i załadowania pustych platform roboczych.



Rys. 2.10. Autonomiczny system wymiany platform roboczych w drukarkach 3D w firmie Evco Plastic [87]

Integracja robota z drukarkami 3D w tym wypadku nie była procesem tak oczywistym. Drukarki nie zostały wyposażone w mechanizmy zdalnej kontroli. Posiadają jednak interfejs WiFi oraz możliwość wysyłania wiadomości e-mail w momencie zakończenia wydruku.

Inżynierowie opracowali więc oprogramowanie przetwarzające nagłówki wiadomości e-mail, aby określić która drukarka zakończyła proces wydruku. Następnie oprogramowanie wykonuje odpowiedni wpis w bazie danych, a po jego przetworzeniu wysyłana jest informacja do sterownika robota o konieczności wykonania odpowiedniego zadania. Rozpoczęcie kolejnego procesu wydruku inicjowane jest poprzez operowanie panelem kontrolnym drukarki 3D poprzez rysik zabudowany w uchwycie robota [88].

2.4.7. Voodoo i projekt Skywalker

Voodoo Manufacturing była firmą pochodzącą z Nowego Jorku zajmującą się produkcją podzespołów wykorzystując przy tym technologię druku 3D. Firma posiadała farmę drukarek 3D składającą się z ponad 200 urządzeń MakerBotReplicator 2 pracujących w technologii wyłaczania materiału (rys. 2.11).

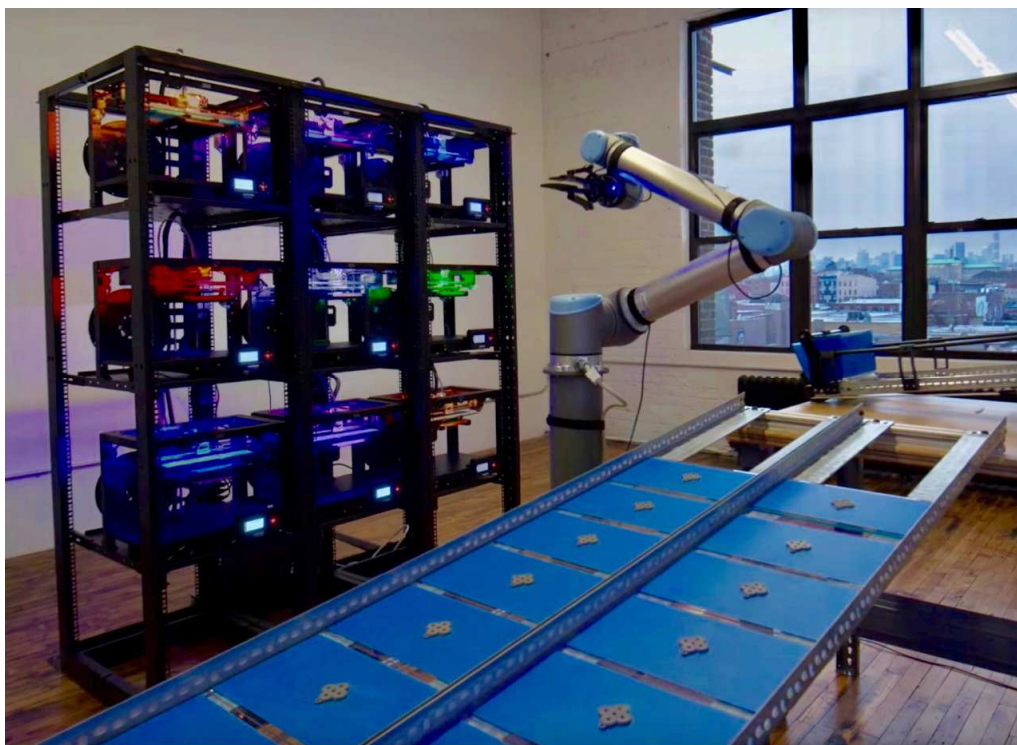


Rys. 2.11. Farma drukarek w fabryce Voodoo Manufacturing [89]

Pierwszym krokiem w celu poprawy wydajności produkcji było opracowanie oprogramowania o nazwie Voodoo Operating System. Oprogramowanie umożliwiała zdalne przesyłanie modeli do wydruku i zarządzanie poszczególnymi drukarkami. Dodatkowo z poziomu strony internetowej klient mógł śledzić status swojego zamówienia w czasie rzeczywistym. System wyróżniał przy tym pięć stanów zamówienia: przygotowanie do druku, druk, pakowanie, w dostawie oraz dostarczono [90]. Aby jednak zwiększyć efektywność produkcji opracowany został interfejs API umożliwiający integrację oprogramowania z zewnętrznymi systemami informatycznymi. Rozwiązanie to wprowadziło funkcjonalność

w postaci tzw. druku na żądanie. Zadaniem klienta było jedynie przesłanie modelu, wybór koloru i materiału. Czynności te wykonać mógł z poziomu serwisu internetowego lub własnej aplikacji zintegrowanej poprzez API. Następnie system dokonywał wyceny w czasie rzeczywistym, kierował wydruk do odpowiedniej drukarki a po zakończonej pracy pracownicy pakowali gotowy model i wysyłali go pod wskazany przy zamówieniu adres [91].

Według przedstawicieli firmy opisany system produkcji zapewniał konkurencyjność wytwarzania w stosunku do metod opartych na wtryskiwaniu materiału w przypadku serii nie przekraczających 10 tysięcy sztuk. Aby jednak wytwarzanie metodą druku 3D stało się korzystniejsze przy seriach rzędu 100 tysięcy sztuk firma zdecydowała się na kolejny krok w kierunku automatyzacji procesu starając się przy tym zredukować koszt produkcji o 90 %. Opracowany został projekt Skywalker. Był to system składający się z klastra 9 drukarek 3D oraz zintegrowanego z nimi robota współpracującego Universal Robots UR10 (rys. 2.12). Zadaniem robota było odbieranie platform z gotowym wydrukiem i odkładanie ich na przenośniku taśmowym oraz zakładanie nowych, czystych platform do drukarek 3D. Po przeprowadzeniu serii testów firma szacowała, że jedno ramię będzie w stanie obsłużyć około 100 drukarek 3D. Ponadto jego wdrożenie pozwoli na zwiększenie ilości obsługiwanych drukarek przez jednego człowieka z liczby 40 do 400. Natomiast okres zwrotu inwestycji związany z zakupem robota wynosić będzie około trzech miesięcy [92].



Rys. 2.12. Skywalker - system automatyzacji druku 3D opracowany przez Voodoo [89]

2.4.8. Formlabs Form Cell

Form Cell jest konstrukcją automatyzującą proces druku 3D zaprezentowaną przez firmę Formlabs podczas targów Hannover Messe w 2018 roku (rys. 2.13). W jej skład wchodzi urządzenia Form 2 pracujące w technologii SLA oraz urządzenie do mycia Form Wash. Automatyczne ramię, poruszające się po listwie umocowanej w górnej części konstrukcji, przenosi platformy z gotowym wydrukiem do stacji myjącej, a po zakończonym cyklu mycia do stacji odbiorczej. Wszystkie urządzenia połączone zostały sieciowo i zarządzane są zdalnie poprzez oprogramowanie umożliwiające kontrolę i monitorowanie przebiegu procesu druku [93].



Rys. 2.13. Zautomatyzowany system produkcji Form Cell wykorzystujący technologię SLA [26]

2.4.9. MosaicArray

W pierwszej połowie 2021 roku Kanadyjska firma Mosaic Manufacturing zaprezentowała zautomatyzowaną konstrukcję o nazwie MosaicArray (rys. 2.14). W jej skład wchodzi 4 drukarki 3D pracujące w technologii wytłaczania materiału o nazwie Element HT pochodzące również od tego producenta. Oryginalnym rozwiązaniem jest zastosowanie systemu Palette 3 umożliwiającego jednoczesne drukowanie z wykorzystaniem 8 różnych materiałów przez jedną głowicę. Do zautomatyzowania procesu odbierania gotowych wydruków wykorzystano ruchome ramię poruszające się na szynie zamontowanej w górnej części konstrukcji.



Rys. 2.14. Zautomatyzowana konstrukcja do druku 3D - MosaicArray [94]

Wydruki wraz z platformą odkładane są do specjalnego magazynka. Magazynek ten porusza się na kółkach co umożliwia sprawną podmianę po wykorzystaniu wolnych półek i zastąpienie go nowym pustym. Taka podmiana eliminuje przestoje podczas produkcji [95]. Producent obecnie pracuje nad rozwiązaniem, które pozwoli połączyć 6 pojedynczych komórek Array w jeden system o nazwie ArrayProduction obsługiwany przez jedno automatyczne ramię [96].

3. TEZA CEL I ZAKRES PRACY

Przyrostowe wytwarzanie wyrobów oparte jest w znacznej części na pracy w środowisku programowym, począwszy od przygotowania modelu 3D-CAD, poprzez obróbkę i analizę danych niezbędnych do budowy modelu fizycznego. W dalszym ciągu druk 3D opiera się na wykonywaniu wielu czynności manualnie przez operatorów oprogramowania i urządzeń. Analizując literaturę i publikacje techniczne można zauważyć różnorodność podejścia do automatyzacji, która w zależności od rozwiązania obejmuje wybrane elementy procesu przyrostowego, nie podejmując kompleksowego ujęcia procesu automatyzacji, informatyzacji i zarządzania produkcją opartą o maszyny przyrostowe. Biorąc to pod uwagę można sformułować tezę, która mówi, że integracja drukarek 3D, systemów numerycznych, systemów monitoringu i zrobotyzowanych urządzeń wykonawczych z zastosowaniem infrastruktury sieciowej umożliwi automatyzację wytwarzania przyrostowego, szczególnie w zakresie operacji przed i poprocesowych co z kolei umożliwi skrócenie czasu pracy operatora i zmniejszenie kosztów wytwarzania produktów.

Celem pracy jest analiza procesu wytwarzania przyrostowego pozwalająca na opracowanie rozwiązań z zakresu automatyzacji produkcji i zarządzania procesem wytwórczym z wykorzystaniem struktur sieciowych w wyniku której zostanie opracowana metodyka automatyzacji i informatyzacji procesu druku 3D opartej o wytłaczanie warstwowe.

Zakres pracy obejmuje szereg działań pozwalających na uzyskanie celu. Spośród nich można wyszczególnić następujące etapy:

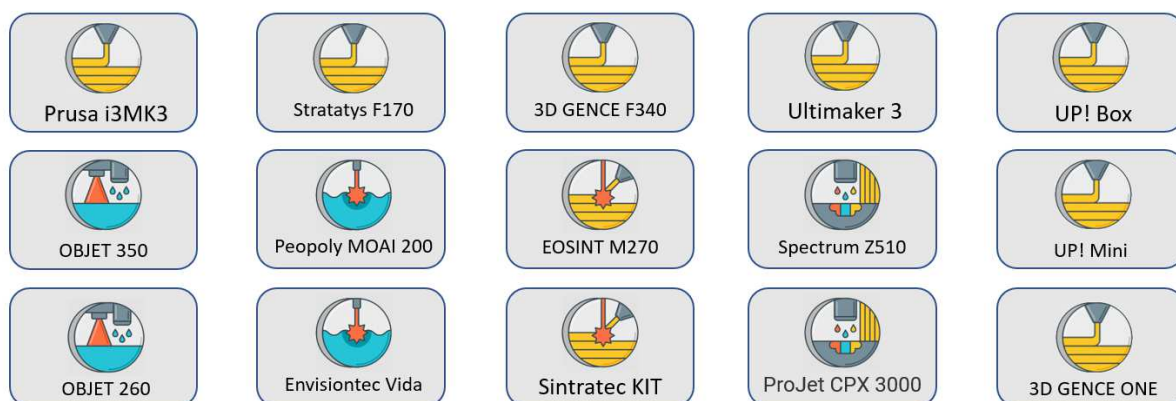
- analiza stanu zagadnienia w zakresie automatyzacji technologii addytywnych,
- określenie możliwości automatyzacji przedprocesowej i poprocesowej w odniesieniu do funkcjonujących technologii druku 3D,
- wybór technologii pozwalającej na automatyzację przedprocesową i poprocesową,
- opracowanie rozwiązań technicznych opartych o zastosowanie robota współpracującego oraz zaprojektowanie stanowiska badawczego,
- opracowanie rozwiązań informatycznych i struktur sieciowych przeznaczonych do automatyzacji, monitoringu i zarządzania procesem przyrostowym,
- opracowanie i wykonanie stanowiska badawczego,
- przeprowadzenie badań scenariuszy automatyzacji w zależności od gabarytów wyrobu i wielkości planowanej partii produkcyjnej,

- przeprowadzenie symulacji środowiska programowego i sieciowego w zakresie integracji i automatyzacji procesu przyrostowego,
- realizację badań z użyciem specjalnie skonstruowanego stanowiska wyposażonego w systemy drukujące, robota współpracującego, infrastrukturę sieciową i oprogramowanie,
- opracowanie metodyki automatyzacji i informatyzacji procesu druku 3D wykorzystującego proces ekstruzji warstwowej polimerowych materiałów termoplastycznych.

4. METODYKA I APARATURA BADAWCZA

4.1. Analiza parku maszynowego i wybór technologii

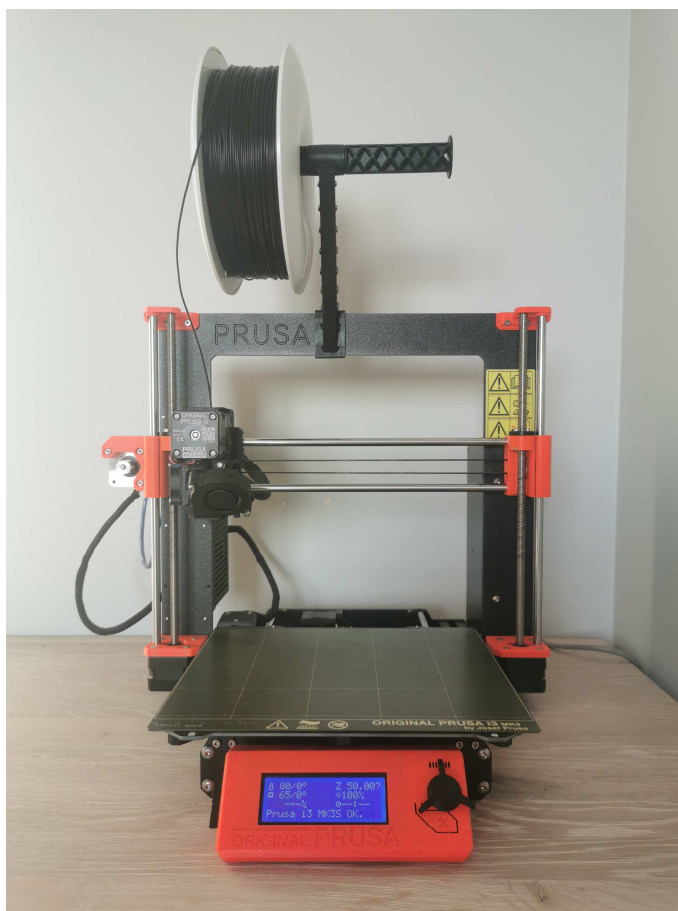
W celu wybrania odpowiedniej metody wytwarzania przyrostowego do późniejszej jej automatyzacji, poza przeprowadzoną analizą stanu zagadnienia, wykonane zostały analizy parku maszynowego i oprogramowania mającego zastosowanie w druku 3D. Przeprowadzono je w oparciu o wybrane urządzenia będące na wyposażeniu Katedry Konstrukcji Maszyn na Politechnice Rzeszowskiej, gdzie od wielu lat prowadzone są prace badawcze wspierające rozwój technik wytwarzania przyrostowego. Maszyny te (rys. 4.1) wykorzystują różne metody druku 3D i stanowią zarazem pewien przekrój reprezentacyjny urządzeń obecnych na rynku na przestrzeni ostatnich lat. Przedstawione urządzenia wykazują zróżnicowany poziom podatności na procesy integracji i automatyzacji. Uwarunkowane jest to zarówno samą technologią wytwarzania w jakiej dane urządzenie pracuje, jego konstrukcją jak i wyposażeniem w odpowiednie interfejsy i protokoły komunikacyjne [97].



Rys. 4.1. Park maszynowy dostępny w Katedrze Konstrukcji Maszyn

Ze względu na istotę działań przed i po procesowych w kontekście obsługi urządzenia, do dalszych badań nad automatyzacją wybrana została metoda MEX. Metoda ta charakteryzuje się wysokim poziomem uniwersalności. W jej oparciu budowane są duże urządzenia klasy przemysłowej jak również mniejsze, budżetowe drukarki 3D klasy desktop, cieszące się sporym zainteresowaniem nie tylko wśród hobbystów ale również w środowisku komercyjnym i naukowym. Urządzenia z tej grupy bardzo często wykazują wysoką podatność na wprowadzanie dodatkowych modyfikacji zarówno sprzętowych jak i programowych. Podyktowane jest to ich otwartym charakterem – producent oferuje swoje urządzenie w niskiej cenie a użytkownik końcowy dostosowuje je we własnym zakresie adekwatnie do swoich potrzeb.

Przykładem takiego urządzenia może być Prusa i3 MK3 (rys. 4.2). Jest to znana i popularna drukarka 3D pracująca w technologii ekstruzji warstwowej. Posiada otwartą przestrzeń roboczą o wymiarach 250 x 210 x 210 mm. Wyposażona została w podgrzewany stół oraz standardowo w jedną głowicę drukującą. Pozwala to na współpracę z szeroką gamą filamentów (PLA, PETG, ASA, ABS, PC, CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP, nGen, Nylon). Producent urządzenia nie wyposażył go w układy sprzętowe pozwalające na przyłączenie do infrastruktury sieciowej. Przenoszenie plików produkcyjnych pomiędzy drukarką a komputerem odbywa się przy pomocy karty pamięci typu SD (Secure Digital). Dostępny jest natomiast port szeregowy pozwalający na przesyłanie komend w standardzie G-Code w czasie rzeczywistym. Podgląd podstawowych parametrów procesu możliwy jest jedynie poprzez menu na wbudowanym ekranie LCD. Urządzenie nie zostało również wyposażone fabrycznie w system monitoringu wizyjnego pozwalającego na zdalną transmisję obrazu na podstawie którego operator mógłby ocenić poprawność przebiegu procesu wydruku. Brak jest również mechanizmów umożliwiających kontrolę ilości dostępnego filamentu.



Rys. 4.2. Drukarka 3D Prusa i3 MK3

Pomimo skromnej funkcjonalności urządzenie charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami technologicznymi pozwalającymi na wytwarzanie wyrobów o wysokiej jakości. Ponadto ze względu na konstrukcję i małe gabaryty urządzenia możliwe jest jego zastosowanie do budowy tanich i skalowalnych środowisk wytwórczych. Wymaga to jednak przeprowadzenia procesu integracji sieciowej a jest to możliwe, ponieważ sterownik urządzenia jest w znacznej mierze kompatybilny z otwartym projektem RepRap. Ze względu na wymienione cechy, urządzenie wybrane zostało do dalszych badań w kontekście opracowania metodyki automatyzacji procesu wytwarzania MEX.

4.2. Integracja sieciowa drukarek 3D

Urządzenia do druku 3D wchodzące w skład przedstawionego parku maszynowego stanowią zespół odrębnych maszyn produkcyjnych. Połączenie ich w jedno spójne, heterogeniczne środowisko wytwórcze zwiększyłoby poziom komfortu i efektywności ich zarządzaniem. W ramach pracy podjęto się analizy możliwości ich integracji we wspólną strukturę sieciową. Analizie poddane zostały fizyczne interfejsy sieciowe dostępne w poszczególnych urządzeniach, wykorzystywane protokoły komunikacyjne i możliwe sposoby przyłączenia do sieci.

Wśród analizowanych maszyn wyróżnić można takie, które współpracują jedynie z oprogramowaniem danego producenta wykorzystując do tego niejawnie protokoły komunikacyjne. Przykładem mogą być urządzenia marki UP! wyposażone w interfejs USB. Ich przyłączenie do struktury sieciowej może odbyć się jedynie poprzez zapewnienie zdalnego dostępu do komputera połączonego z drukarką 3D przewodem USB. Podobnie wygląda sytuacja w przypadku drukarek 3D Objet Eden 260 i Objet 350 Connex 3. Maszyny te wyposażone zostały jednak w przewodowy interfejs sieciowy LAN umożliwiający przyłączenie do sieci lokalnej.

Druga grupa urządzeń to maszyny charakteryzujące się szerokimi możliwościami w zakresie integracji sieciowej. Wśród nich wymienić można Stratatys F170 i Ultimaker3. Obydwie wyposażone zostały w możliwość przewodowego podłączenia do sieci a Ultimaker 3 posiada dodatkowo bezprzewodowy interfejs WiFi. W obu przypadkach producenci urządzeń udostępnili dokumentację protokołów komunikacyjnych. Stratatys ponadto przygotował zestaw narzędzi programistycznych SDK (Software Development Kit) ułatwiający integrację drukarek 3D z systemami informatycznymi nowoczesnych, inteligentnych fabryk.

Trzecia grupa drukarek 3D to urządzenia bez fabrycznych interfejsów sieciowych, których integracja możliwa jest poprzez zastosowanie zewnętrznych serwerów wydruku. Wyróżnić tutaj można dwa typy rozwiązań: zamknięte i otwarte. Pierwsze z nich współpracują jedynie z oprogramowaniem danego dostawcy (np. Repetier lub 3DQue). Możliwości ich konfiguracji i dostosowania są bardzo ograniczone. Rozwiązania otwarte pozwalają natomiast na elastyczne i kompleksowe podejście do tematu integracji sieciowej. Do tego typu rozwiązań zaliczyć można np. oprogramowanie Octoprint. Wśród drukarek trzeciej grupy wymienić można urządzenie 3D Gence F340. Mimo, że jego producent nie podaje informacji na temat możliwości pracy sieciowej urządzenia to w ramach przeprowadzonych prac zostało zrealizowane połączenie sieciowe poprzez zastosowanie zewnętrznego serwera wydruku Repetier. Drugim przykładem są drukarki Prusa i3 MK3. Politechnika Rzeszowska posiada kilkanaście sztuk takich urządzeń w Laboratorium Szybkiego Prototypowania (rys. 4.3). Wykorzystywane są do prac badawczych oraz do celów edukacyjnych.



Rys. 4.3 Drukarki 3D Prusa i3MK3 w Laboratorium Szybkiego Prototypowania

Drukarki 3D Prusa i3 MK3 można rozszerzyć o funkcjonalność sieciową na kilka sposobów. Jeden z nich, zastosowany w Laboratorium Szybkiego Prototypowania, polega na wykonaniu drobnej modyfikacji sprzętowej. Do jej wykonania potrzebny jest miniaturowy komputer jednopłytkowy Raspberry Pi Zero W z zainstalowanym oprogramowaniem Octoprint oraz elementy montażowe wykonane techniką druku 3D (rys. 4.4). Układ elektroniczny należy wpiąć bezpośrednio do złącza portu szeregowego na płycie kontrolera drukarki 3D. Rozwiązanie to nie wymaga zastosowania dodatkowego zasilacza.



Rys. 4.4. Elementy użyte do modyfikacji sprzętowej w celu rozszerzenia Prusa i3 MK3 o funkcjonalność sieciową

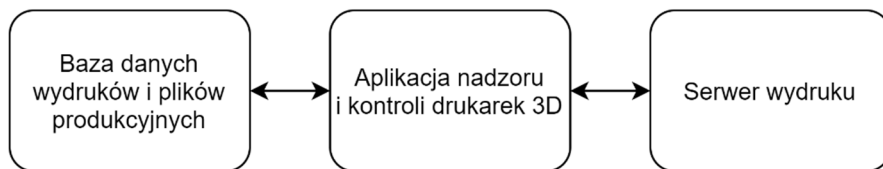
Komputer tej klasy posiada jednak niską moc obliczeniową. Twórcy oprogramowania nie zalecają w tym wypadku instalacji większej liczby dodatkowych wtyczek i rozszerzeń. W trakcie testów zainstalowana została jednak wtyczka OctoEverywhere umożliwiająca zdalny dostęp z dowolnego miejsca i w trakcie wydruków nie stwierdzono negatywnego wpływu na przebieg procesów druku 3D. Oprogramowanie Octoprint może być również zainstalowane na znacznie mocniejszym komputerze jednopłytkowym, np. Raspberry Pi 4. Jednak w tym wypadku do połączenia z drukarką wykorzystywany jest przewód USB. Ponadto wymaga to zastosowania dodatkowego zasilacza sieciowego. Sposób ten wykorzystany został podczas budowy laboratoryjnego stanowiska badawczego wykonanego na potrzeby niniejszej pracy.

4.3. Mechanizm kontroli ilości i typu dostępnego materiału

Jednym z niezbędnych elementów zautomatyzowanego środowiska wytwarzania przyrostowego jest pomiar i monitorowanie ilości dostępnego materiału produkcyjnego. Dla drukarek 3D pracujących w technologii wytłaczania przyrostowego materiałem tym jest filament – półfabrykat z tworzywa termoplastycznego w formie żyłki o ustandaryzowanej średnicy (1,75, 2,85 lub 3,00 mm). W sprzedaży może występować w postaci luźnych zwojów, jednak najczęściej nawijany jest na szpule [98]. Pomiar i monitorowanie ilości może dotyczyć pojedynczej drukarki 3D lub całego magazynu materiałów produkcyjnych. W ramach prac nad metodyką automatyzacji opracowane zostały cztery modele systemu pomiaru i ewidencji dostępnego materiału. Ich strukturę, zasadę działania, a także zestawienie zalet i wad przedstawiono poniżej.

Model I – standardowy uproszczony

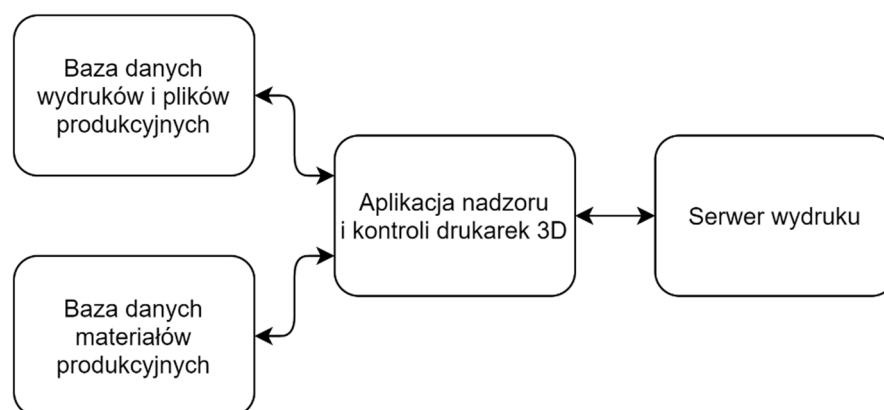
W modelu tym (rys. 4.5) nie zostały uwzględnione mechanizmy bezpośredniego pomiaru ilości filamentu w szpuli zainstalowanej w drukarce 3D. Użytkownik każdorazowo po zmianie szpuli poprzez aplikację nadzorującą podaje typ i ilość dostępnego filamentu. W przypadku nowych szpul – wagę materiału netto podaje producent. Natomiast w przypadku szpul wykorzystywanych już wcześniej operator musi określić ilość na podstawie manualnego zważenia szpuli lub wartości zanotowanej przed wcześniejszym jej demontażem. Po każdym wykonanym wydruku ilość dostępnego materiału jest aproksymowana poprzez jej pomniejszenie o ilość materiału wymaganego do wytworzenia danego obiektu. Wartość ta pobierana jest z bazy danych wydruków i plików produkcyjnych.



Rys. 4.5. Struktura systemu pomiaru i ewidencji dostępnego filamentu – model I „standardowy uproszczony”

Model II – standardowy rozszerzony

Model ten (rys. 4.6) stanowi rozszerzenie modelu I poprzez zastosowanie bazy danych materiałów produkcyjnych. Baza zawiera informacje dotyczące materiałów jako produktów (producent, typ, kolor, całkowita ilość w pełnej szpuli, dostawca itp.) jak i informacje o konkretnej szpuli (unikatowy identyfikator, typ produktu, ilość pozostałego materiału). Przed wykorzystaniem nowej szpuli filamentu, użytkownik tworzy wpis do bazy danych przypisując jej indywidualny identyfikator oraz typ produktu. Natomiast dane dotyczące typu produktu wprowadzane są jedynie w przypadku, gdy produkt danego typu nie był stosowany nigdy wcześniej i informacje na jego temat nie zostały zapisane w bazie danych. Aproksymacja ilości dostępnego materiału w danej szpuli odbywa się analogicznie jak w przypadku modelu I, jedyną różnicą jest to, że operator przypisuje daną szpulę do drukarki 3D poprzez podanie jej unikatowego numeru z poziomu aplikacji nadzorującej. Wartość ta przechowywana jest w bazie danych zarówno dla szpul aktualnie wykorzystywanych, jak i przechowywanych w magazynie. Informacje te wykorzystywane mogą być w procesach logistycznych w celu określenia konieczności zamówienia materiału do realizacji danego zamówienia.



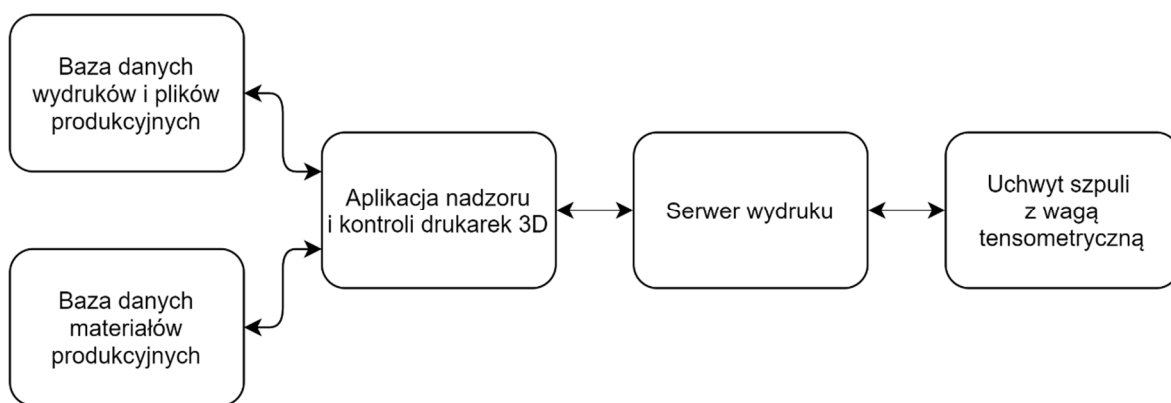
Rys. 4.6. Struktura systemu pomiaru i ewidencji dostępnego filamentu – model II „standardowy rozszerzony”

Model III – zautomatyzowany uproszczony

Model zautomatyzowany uproszczony (rys. 4.8) zakłada wyposażenie drukarek 3D w specjalistyczny uchwyt szpuli z wbudowaną wagą np. w postaci belki tensometrycznej (rys. 4.7) [99], [100]. Układ ten wskazuje łączną wagę szpuli i nawiniętego na nią materiału. W celu wyznaczenia ilości pozostałego materiału należy od wartości tej odjąć wagę pustej szpuli. Producenci filamentu zazwyczaj podają tę wartość w nocie katalogowej produktu. Operator przypisuje ją do bazy danych produktów. Dzięki zastosowaniu układu ważącego, ilość dostępnego materiału w szpulach wyznaczana jest w sposób precyzyjny na podstawie pomiarów a nie aproksymacji. Wadą rozwiązania jest jednak ciągła konieczność manualnego przypisywania szpuli do danej drukarki 3D.



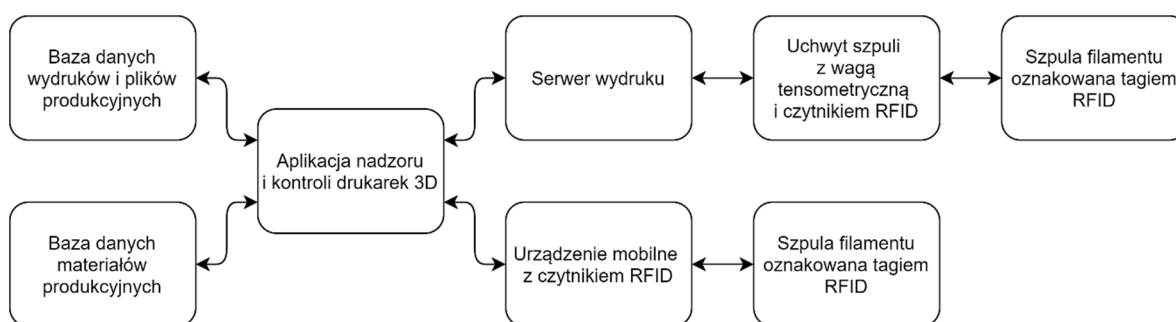
Rys. 4.7. Opracowany uchwyt szpuli wyposażony w wagę w postaci belki tensometrycznej



Rys. 4.8. Struktura systemu pomiaru i ewidencji dostępnego filamentu – model III „automatyczny podstawowy”

Model IV – zautomatyzowany rozszerzony

Model ten (rys. 4.9) zakłada wyposażenie drukarek 3D w specjalistyczne uchwyty szpuli rozszerzone o automatyczny układ identyfikacji szpuli (rys. 4.10). Identyfikacja odbywa drogą bezprzewodową w momencie założenia szpuli na uchwyt poprzez odczyt informacji ze znaczników RFID (Radio Frequency Identification) w postaci przyklejanych naklejek (rys. 4.11) [101], [102], [103]. Wśród odczytywanych informacji znajduje się unikatowy numer ID szpuli pozwalający jednoznacznie zidentyfikować ją w bazie danych. Numer ID programowany jest jednorazowo przez operatora przy przyjęciu szpuli do magazynu materiałów produkcyjnych. Odczyt danych ze znacznika możliwy jest również poprzez większość urządzeń mobilnych. Dzięki temu łatwiejsze staje się fizyczne zlokalizowanie konkretnej szpuli w magazynie materiałów produkcyjnych.



Rys. 4.9. Struktura systemu pomiaru i ewidencji dostępnego filamentu – model VI „automatyczny rozszerzony”



Rys. 4.10. Czytnik tagów RFID zabudowany w uchwycie szpuli



Rys. 4.11. Szpula oznaczona tagiem RFID

Przedstawione modele monitorowania ilości i stanu magazynowych materiałów produkcyjnych różnią się stopniem złożoności i kosztem implementacji. Modele standardowe mogą znaleźć zastosowanie w małych systemach wytwórczych o niskich poziomach zautomatyzowania. W większych środowiskach produkcyjnych warto wprowadzić modele zautomatyzowane. W szczególności model zautomatyzowany rozszerzony może znaleźć zastosowanie podczas często zmieniającej się produkcji zleconej z wykorzystaniem szerokiej gamy materiałów produkcyjnych. Zestawienie zalet i wad poszczególnych modeli przedstawione zostało w tab. 4.1.

Tab. 4.1. Zestawienie zalet i wad poszczególnych modeli pomiaru i ewidencji dostępnego filamentu

Model	Zalety	Wady
Model I – standardowy uproszczony	<ul style="list-style-type: none"> Niski koszt implementacji, niezależny od ilości drukarek 3D. 	<ul style="list-style-type: none"> Działanie operatora wymagane jest po każdej wymianie materiału. Wymagana znajomość ilości filamentu dostępnego w szpuli przed montażem. Aproksymacja może powodować błędy w oszacowaniu dostępną ilości materiału. Brak informacji na temat stanów magazynowych dostępnych materiałów.

Model II – standardowy rozszerzony	<ul style="list-style-type: none"> • Niski koszt implementacji, niezależny od ilości drukarek 3D. • Usprawnienie procesu wprowadzania wpisów dla nowych szpul filamentu, po wprowadzeniu danych dotyczących wykorzystywanych produktów. • Dostępna baza danych stanów magazynowych materiałów produkcyjnych. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność ręcznego wprowadzania wpisów do bazy danych oraz wizualnej identyfikacji szpul. • Konieczność ręcznego wprowadzania identyfikatora szpuli poprzez interfejs aplikacji. • Aproksymacja może powodować błędy w oszacowaniu dostępnej ilości materiału.
Model III – zautomatyzowany uproszczony	<ul style="list-style-type: none"> • Precyzyjny i pewny pomiar ilości dostępnego materiału. • Usprawnienie procesu wprowadzania wpisów dla nowych szpul filamentu, po wprowadzeniu danych dotyczących wykorzystywanych produktów. • Dostępna baza danych stanów magazynowych materiałów produkcyjnych. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność ręcznego wprowadzania wpisów do bazy danych oraz wizualnej identyfikacji szpul. • Konieczność ręcznego wprowadzania identyfikatora szpuli poprzez interfejs aplikacji. • Konieczność wyposażenia drukarek 3D w uchwyty szpul filamentu wyposażone w wagę tensometryczną.
Model IV – zautomatyzowany rozszerzony	<ul style="list-style-type: none"> • Automatyczne rozpoznawanie szpuli filamentu (typ, producent, dostępna ilość itp.) • Precyzyjny i pewny pomiar ilości dostępnego materiału. • Usprawnienie procesu wprowadzania wpisów dla nowych szpul filamentu, po wprowadzeniu danych dotyczących wykorzystywanych produktów. • Dostępna baza danych stanów magazynowych materiałów produkcyjnych. • Możliwość wykonania szybkiego skanowania szpul filamentu. • Możliwość wielokrotnego wykorzystania znaczników RFID. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność ręcznego wprowadzania wpisów do bazy danych podczas wprowadzania nowych szpul. • Konieczność wyposażenia drukarek 3D w uchwyty szpul filamentu wyposażone w wagę tensometryczną oraz czytnik RFID.

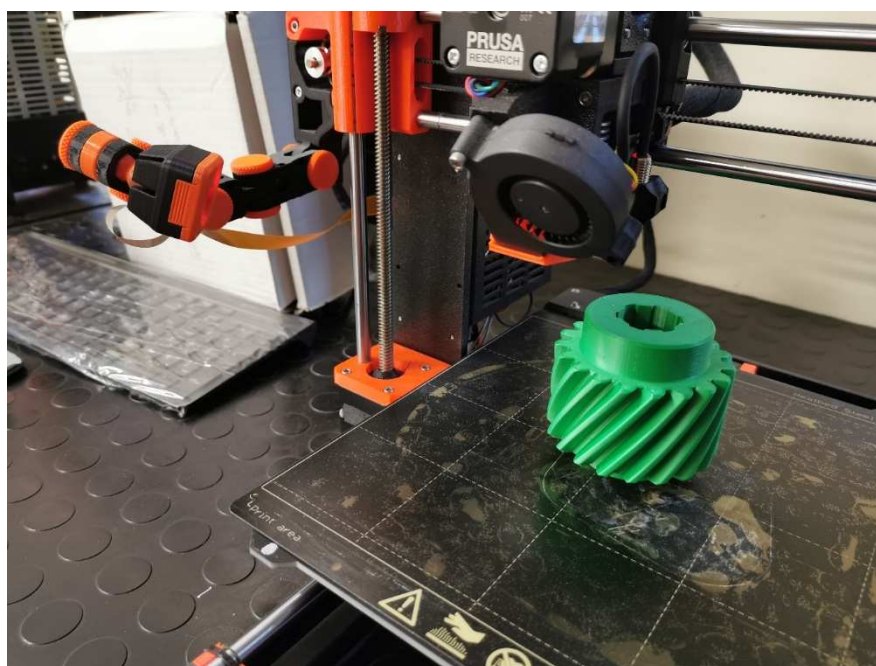
4.4. Monitoring wizyjny procesu wytwarzania

Monitoring wizyjny jest niezwykle ważnym elementem automatycznych i posiadających zdolności do pracy sieciowej systemów wytwarzania przyrostowego. Jego wdrożenie pozwala na zdalny podgląd przebiegu procesów wydruku z dowolnego miejsca [104]. Oszczędza to czas potrzebny na podejście operatora do poszczególnych maszyn produkcyjnych w celu wykonania wzrokowej inspekcji poprawności jego przebiegu. Dodatkowo implementacja algorytmów sztucznej inteligencji do detekcji defektów w czasie rzeczywistym pozwala na szybką reakcję, co w konsekwencji wpływa na redukcję traconego czasu i materiału.

Drukarki 3D rzadko wyposażane są standardowo w kamery wizyjne, rzadko jest to również wyposażenie opcjonalne. Instalację kamery najczęściej dokonuje użytkownik we

własnym zakresie. Często kamera przyłączana jest do zintegrowanego wcześniej serwera wydruku. W zależności od jej typu połączenie odbywa się poprzez uniwersalny interfejs USB lub inny specjalistyczny np. CSI (Camera Serial Interface).

Monitorowanie zespołu drukarek 3D rozwiązać można na dwa sposoby. Pierwszy z nich zaimplementowany został w Laboratorium Szybkiego Prototypowania. Polegał na instalacji osobnych kamer dla każdej drukarki 3D ukierunkowanych na ich stoły robocze. Wykorzystano do tego budżetowe układy elektroniczne kamer typu „open-frame” posiadające matrycę o rozdzielczości 5Mpx i pozwalające na nagrywanie obrazu w rozdzielczości 1080p z szybkością 30 FPS. Układy zabudowane zostały w przegubowy uchwyt wytworzony metodą druku 3D (rys. 4.12), a następnie podłączone do doposażonych wcześniej serwerów wydruku. Rozwiązanie takie umożliwiło zdalny podgląd przebiegu procesu za pośrednictwem platformy chmurowej OctoEverywhere oraz nadzór poprawności wydruku w czasie rzeczywistym przez algorytm sztucznej inteligencji – Gadget. Podobne rozwiązanie zastosowane zostało podczas budowy stanowiska badawczego. Jednak w tym wypadku zastosowano kamery internetowe połączone z serwerem wydruku poprzez interfejs USB.

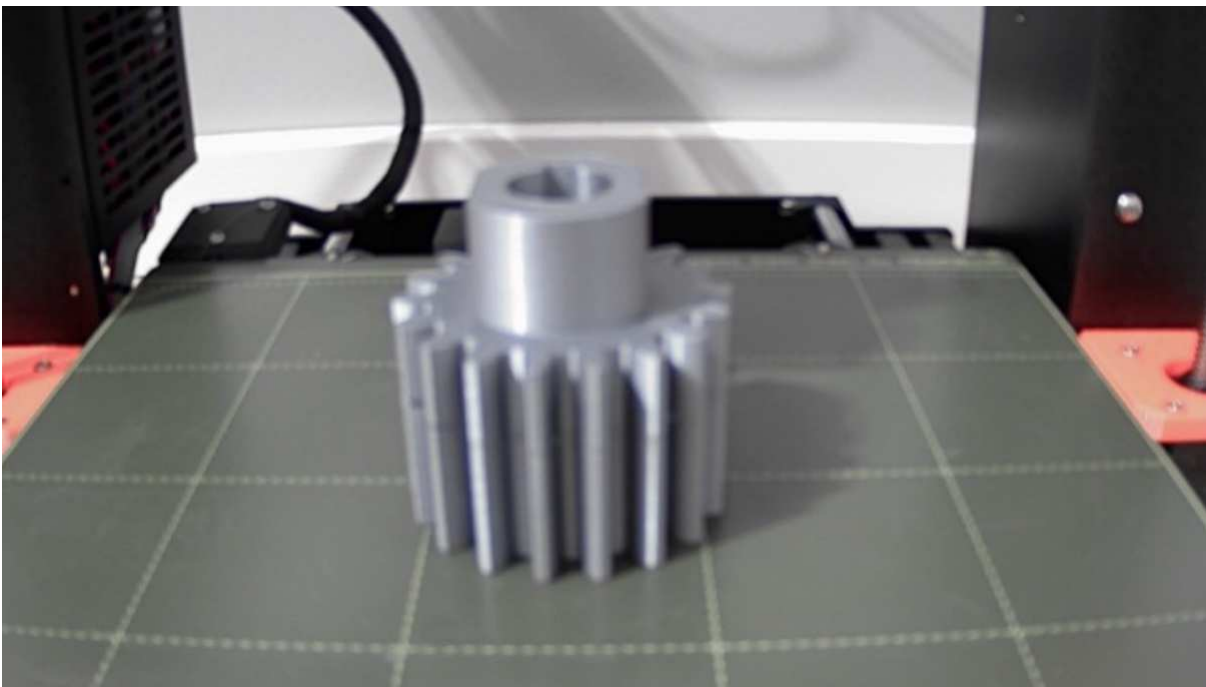


Rys. 4.12. Wykonany układ monitorowania wydruku z wykorzystaniem kamery „open-frame” zamontowanej na przegubowym uchwycie

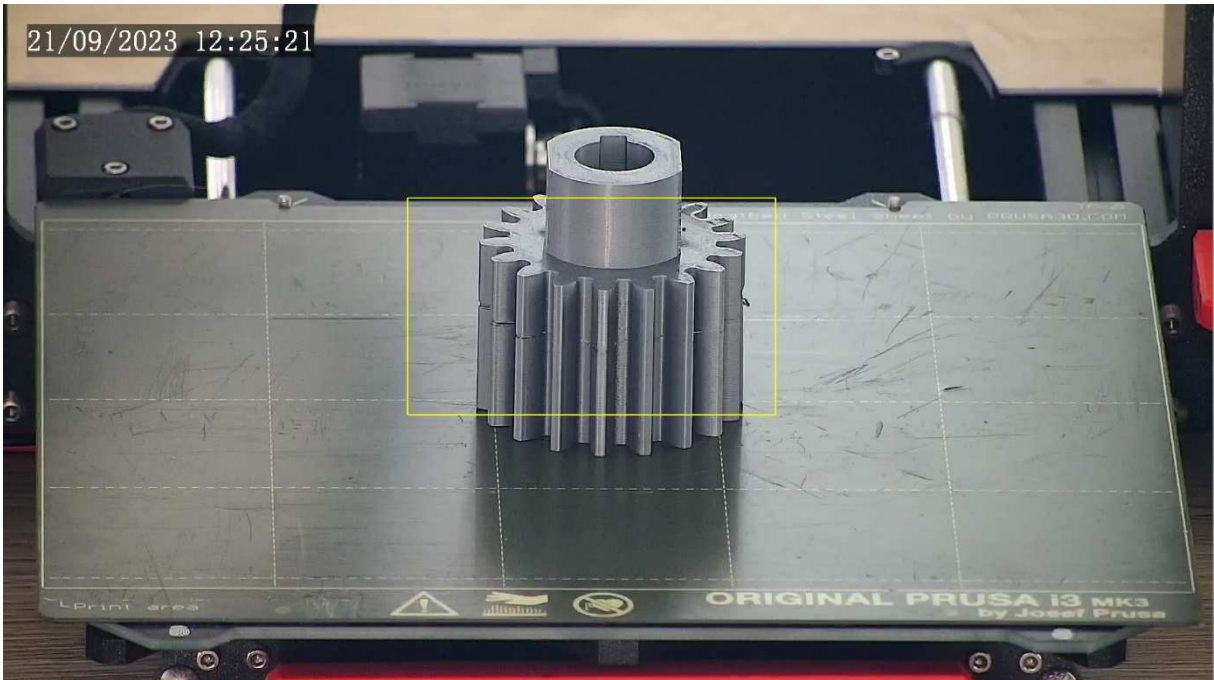
Drugim sposobem jest zastosowanie pojedynczej wyspecjalizowanej kamery o wysokiej rozdzielczości. Urządzenie musi posiadać mechanizmy zdalnego obrotu, pochylania oraz ustawienia powiększenia w celu precyzyjnego ukierunkowania obiektywu na przestrzeń roboczą wybranej drukarki 3D. Obraz z takiego urządzenia jest bardzo dobrej jakości, nawet

gdy kamera znajduje się w odległości kilku metrów od obserwowanego obiektu. Wysoka jakość pozwala na szybkie dostrzeżenie przez operatora powstających błędów podczas wydruku. Problematiczna jest jednak konfiguracja i ustawienie optymalnego kąta obserwacji dla wszystkich urządzeń w środowisku wytwórczym w celu rejestracji obrazu na potrzeby detekcji uszkodzeń wydruku przez algorytmy sztucznej inteligencji.

Rys. 4.13 i rys. 4.14 przedstawiają porównanie jakości obrazu rejestrowanego przez budżetową kamerę USB i kamerę wysokiej rozdzielczości o dużym przybliżeniu optycznym. Kamera budżetowa zamocowana została na statywie w odległości około 30 cm od stołu roboczego drukarki 3D. Natomiast kamera o wysokiej rozdzielczości podwieszona została pod sufitem pomieszczenia w odległości około 4 metrów od obserwowanego modelu. Kamera ta wyposażona została w ruchomy obiektyw z regulowanym przybliżeniem optycznym. Do wykonania zdjęcia zastosowano maksymalne 33-krotne przybliżenie. Mimo znacznej różnicy w odległości obraz rejestrowany przez tę kamerę cechuje się dużo lepszą jakością. Urządzenie posiada dodatkowo opcję powiększenia cyfrowego. Zastosowanie jej pozwoliło na zaobserwowanie defektów powstałych w trakcie wydruku. W przypadku koła zębatego było to rozwarstwienie modelu na wskutek zaburzenia przepływu materiału w ekstruderze rys. 4.15.



Rys. 4.13. Obraz modelu koła zębatego rejestrowany przez budżetową kamerę USB

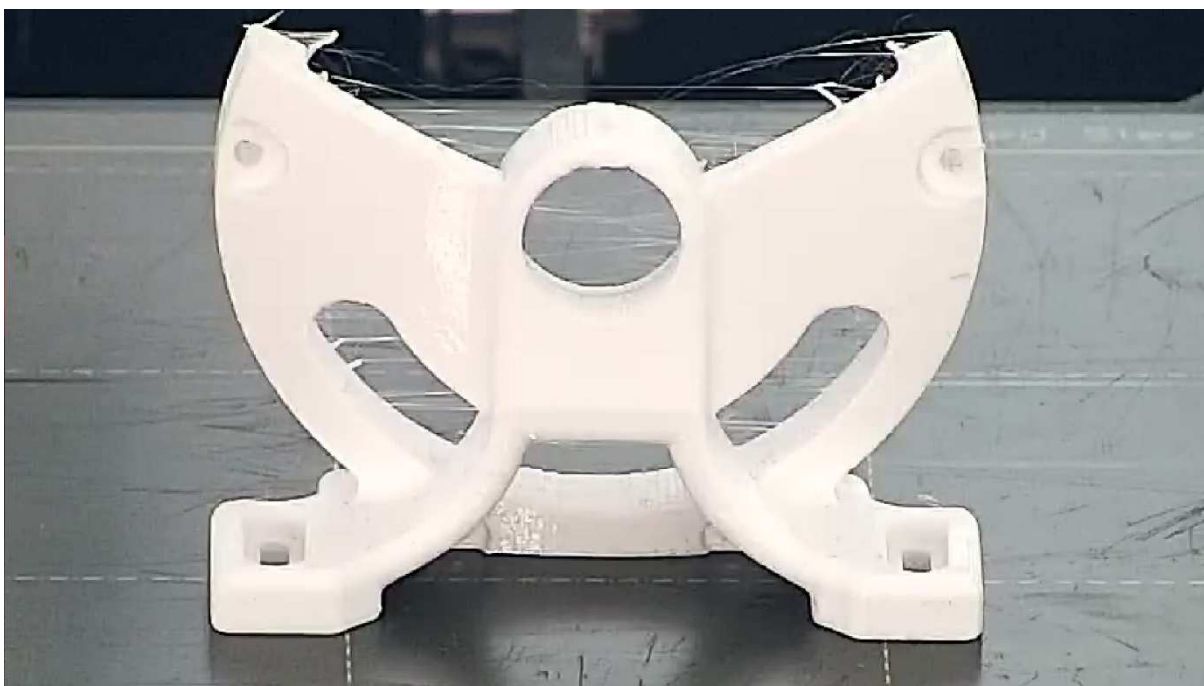


Rys. 4.14. Obraz modelu koła zębatego rejestrowany ze znacznej odległości przez kamerę o dużym przybliżeniu



Rys. 4.15. Obraz modelu koła zębatego rejestrowany ze znacznej odległości przez kamerę o dużym przybliżeniu – widoczny efekt rozwarstwienia

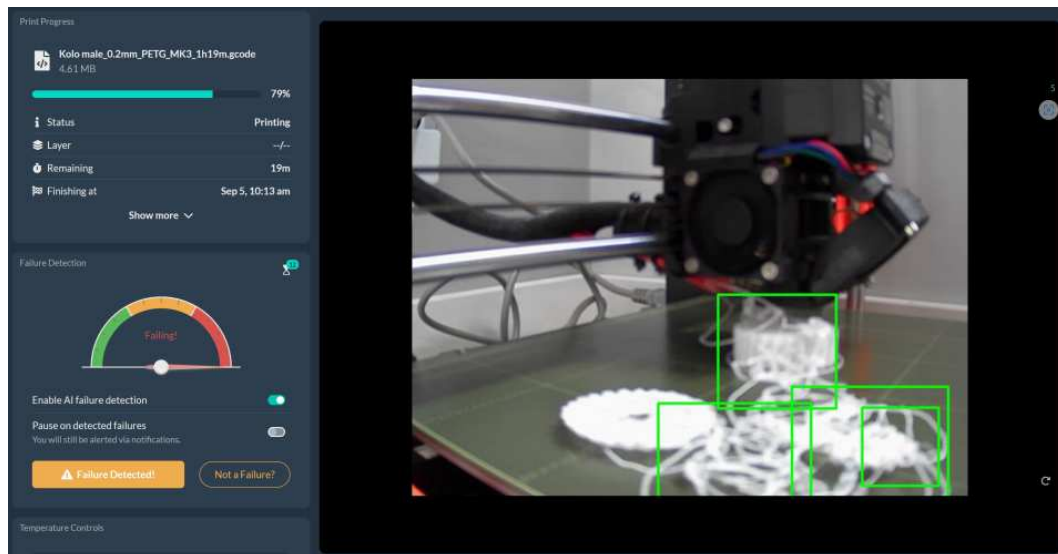
Zastosowanie kamery o zaawansowanych parametrach umożliwiło również zaobserwowanie tzw. efektu nitkowania w procesie wytwarzania modelu korpusu przekładni (rys. 4.16). Efekt ten ma postać zwisających włosków w miejscach, gdzie głowica drukująca wykonuje długie ruchy jałowe i spowodowany jest najczęściej poprzez zbyt wysoką temperaturę ekstrudera lub źle dobrane parametry retrakcji. Defekt ten zazwyczaj nie dyskwalifikuje wytworzonego modelu, gdyż może być usunięty podczas ręcznej obróbki poprocesowej.



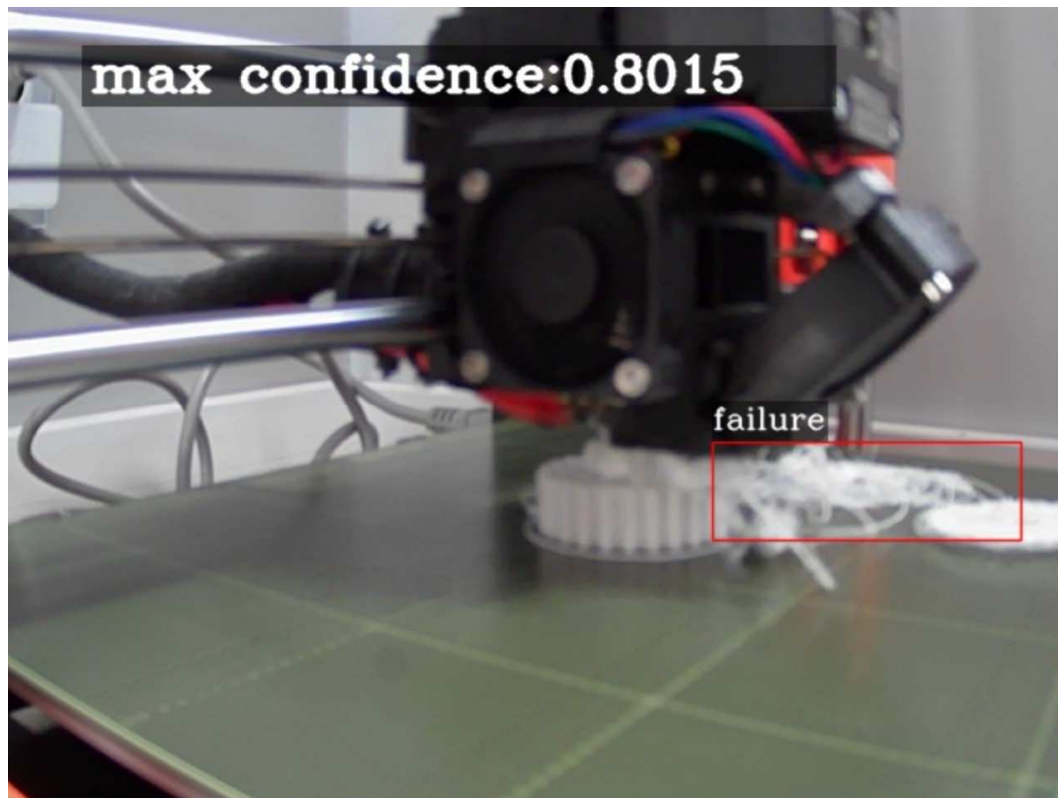
Rys. 4.16. Obraz modelu korpusu przekładni rejestrowany ze znacznej odległości przez kamerę o dużym przybliżeniu – widoczny efekt nitkowania

W ramach prac doświadczalnych analizowano możliwości powszechnie znanych aplikacji bazujących na algorytmach sztucznej inteligencji do detekcji uszkodzeń drukowanych modeli 3D. Wśród nich wyróżnić można oprogramowanie darmowe oraz płatne, przy czym te drugie posiadają najczęściej darmową wersję z pewnymi ograniczeniami. Ponadto wyróżnić można rozwiązania przetwarzające dane w chmurze (np. Obico i Gadget) oraz rozwiązania wykorzystujące serwer aplikacji instalowany w sieci lokalnej (np. Nexus AI). Przeprowadzone prace pozwoliły wnioskować, że skuteczność analizowanych algorytmów w dużej mierze zależy od jakości transmitowanego obrazu oraz warunków oświetleniowych przestrzeni roboczej drukarki 3D. Warto jednak nadmienić, że nawet przy zastosowaniu

kamer niskiej jakości, algorytmy te bardzo dobrze rozpoznają poważne uszkodzenia, np. w postaci tzw. „spaghetti” (rys. 4.17 i rys. 4.18).



Rys. 4.17. Detekcja uszkodzenia wydruku przez algorytm sztucznej inteligencji oprogramowania Obico



Rys. 4.18. Detekcja uszkodzenia wydruku przez algorytm Nexus AI

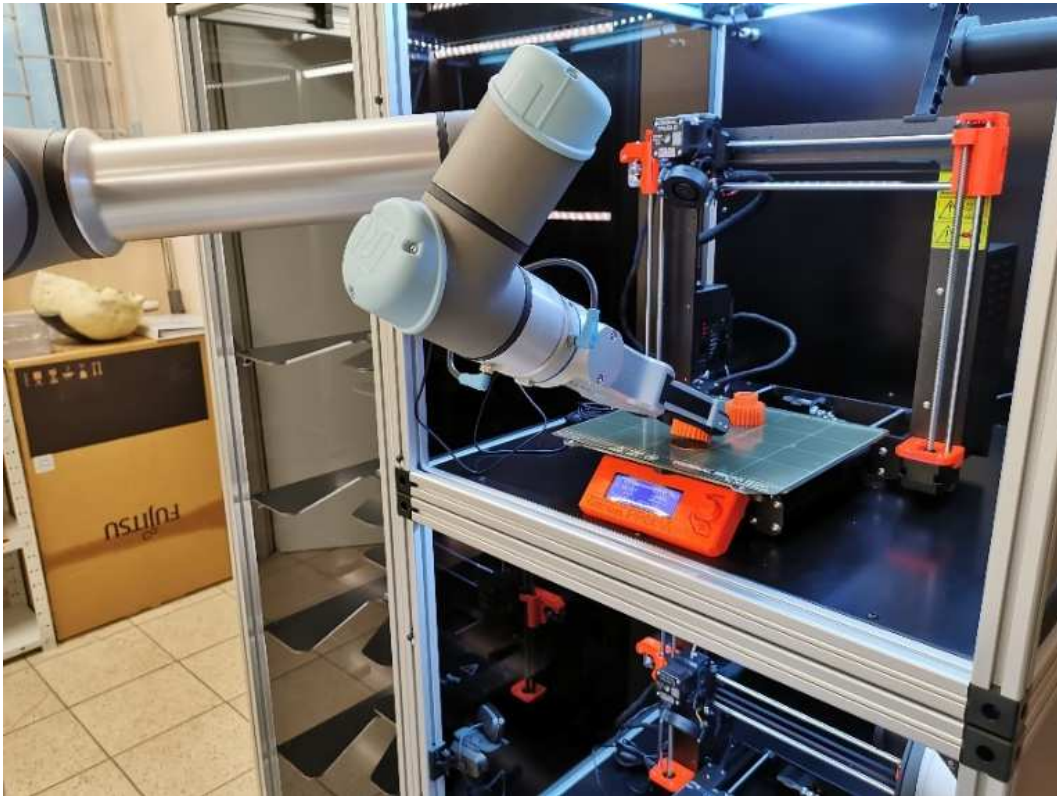
4.5. Transport wyrobów z zastosowaniem robota współpracującego

Wykonanie każdego kolejnego wydruku na danej drukarce 3D wiąże się z koniecznością przygotowania platformy roboczej. Może to zostać zrealizowane na dwa sposoby: poprzez oderwanie modelu od platformy i wyczyszczenie jej powierzchni lub poprzez wymianę całej platformy na nową – czystą i przygotowaną do wydruku. W obydwu przypadkach, aby zapewnić ciągłość produkcji, należy proces ten zautomatyzować w sposób nie wymagający każdorazowego działania operatora. W ramach prac nad metodyką wypracowane zostały dwa podejścia do rozwiązania tego problemu, w obydwu wykorzystane zostało ramię robota współpracującego UR5e. Jest to średniej wielkości robot przeznaczony do współpracy z ludźmi. Posiada zasięg w promieniu 850 mm i maksymalny udźwig 5 kg. Wyposażony został w sporą liczbę funkcji bezpieczeństwa oraz czujnik siły. Na rynku dostępny jest szeroki wachlarz kompatybilnych z nim narzędzi i chwytaków. Integralnymi częściami robota jest skrzynia zkomputerem sterującym oraz panel kontrolny w postaci ekranu dotykowego wyposażony w przełącznik awaryjnego zatrzymania. Praca z robotem najczęściej polega na uruchamianiu opracowanych wcześniej programów. Operację tę wykonać można z poziomu panelu kontrolnego lub zdalnie drogą sieciową. Komputer robota wyposażony został w interfejs przewodowego połączenia sieciowego LAN umożliwiający integrację sieciową. Posiada również sporą liczbę metod zdalnej kontroli, którym brakuje jednak mechanizmów autoryzacji dostępu. Jedynym uwarunkowaniem możliwości pracy zdalnej jest aktywacja trybu „remote” z poziomu panelu kontrolnego lub zewnętrznego przełącznika.

Pierwsze analizowane podejście zakłada wykorzystanie elektrycznego chwytaka dwupalczastego zamontowanego na robocie współpracującym [105], [106]. Robot poprzez sekwencję odpowiednich ruchów (obroty wokół wybranej osi modelu, posuwu z zadaną siłą) odrywa model od platformy roboczej, następnie przenosi go w miejsce magazynowania. Istotną kwestią w aspekcie skuteczności metody jest opracowanie odpowiedniej sekwencji ruchu dla konkretnego wytwarzanego obiektu. Należy założyć odpowiednią siłę odrywającą obiekt, jak również siłę ściskającą palce robota, tak aby nie uszkodzić wytwarzanej części.

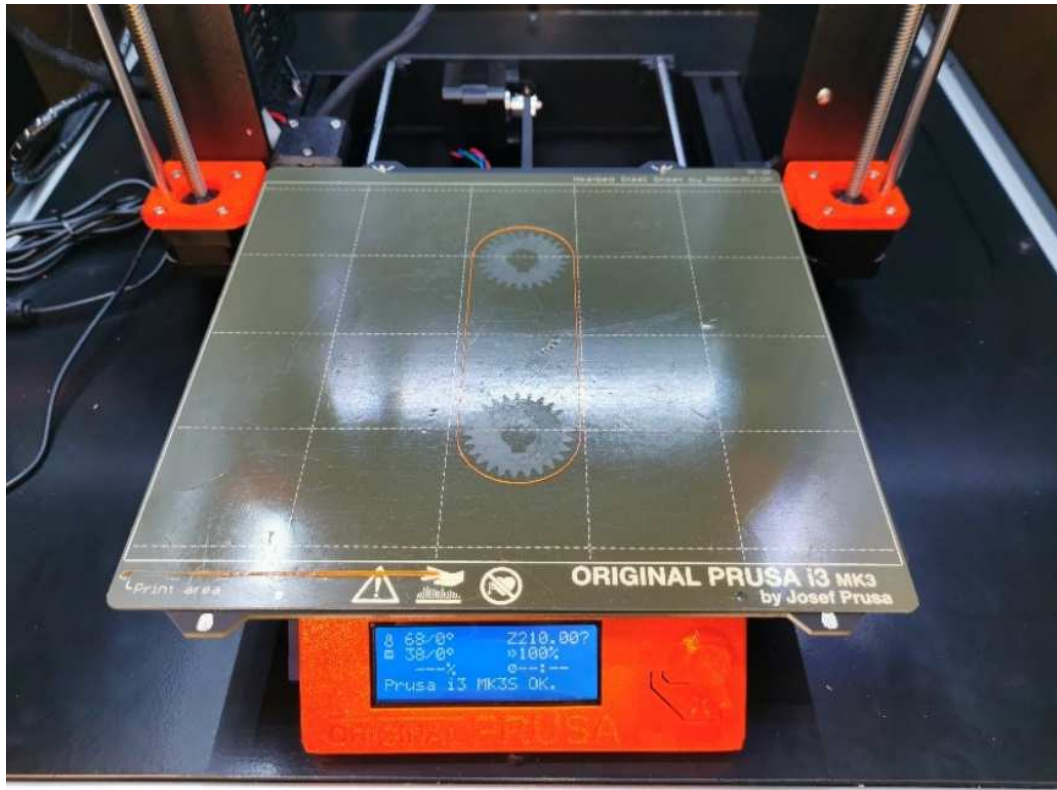
W celu określenia możliwości zastosowania przedstawionej metody wykonano próby z wykorzystaniem chwytaka RG6 firmy OnRobot (rys. 4.19). Jest to chwytak o konstrukcji z dwoma palcami o maksymalnym ich rozsunięciu wynoszącym 150 mm. Oprogramowanie chwytaka udostępnia szereg funkcji w tym .in.: automatyczne wykrywanie chwytu lub jego braku, wykrywanie ciągłości chwytu, pomiar rozsunięcia palców oraz automatyczną

kompensację głębokości chwytu w celu wyliczenia środka ciężkości narzędzia. Możliwe jest również zadawanie maksymalnej siły ściskającej.



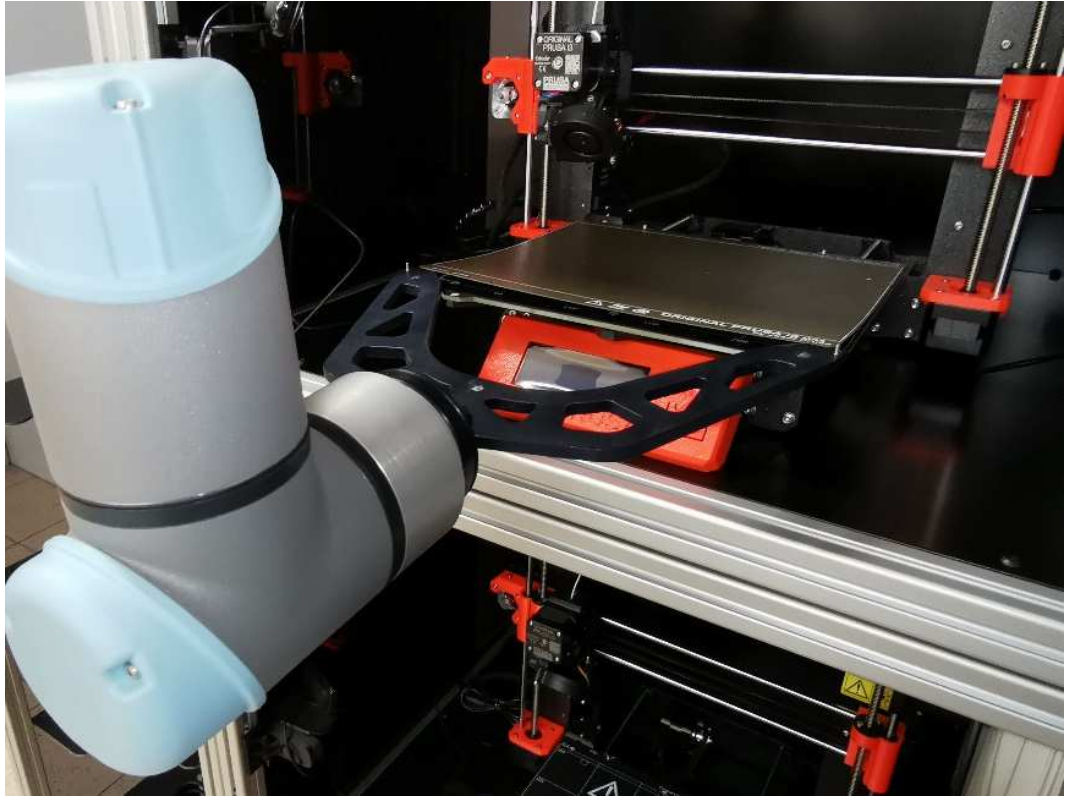
Rys. 4.19. Odrywanie modelu z platformy roboczej przy wykorzystaniu chwytaka palczastego

W trakcie badań eksperymentalnych wykonano próby oderwania modelu koła zębatego z platformy roboczej drukarki. Próby potwierdziły wykonalność oderwania obiektu od platformy roboczej, jednak implementacja tej metody w zautomatyzowanym środowisku wytwórczym wydaje się być mocno utrudniona. Zaletą tego podejścia jest niewątpliwie dostępność gotowych chwytaków na rynku. Jest to również rozwiązanie niezależne od konstrukcji stołów roboczych drukarek 3D. Zauważono jednak znaczne trudności a nawet brak możliwości usuwania pozostałości filamentu i fragmentów podpór na platformie roboczej (rys. 4.20). Doprowadza to do degradacji powierzchni platformy z każdym kolejnym wydrukiem co wpływa pośrednio na jakość wytwarzanych obiektów. Sporym utrudnieniem jest również fakt, że dla każdego wytwarzanego obiektu należy wyznaczyć indywidualną trajektorię ruchu chwytaka. Istnieje również ryzyko uszkodzenia obiektu w przypadku źle dobranej siły.



Rys. 4.20. Widok platformy roboczej po usunięciu modeli (widoczne pozostałości filamentu niemożliwe do usunięcia przy pomocy chwytaka palczastego)

Drugie podejście zakłada podmianę całej zadrukowanej platformy na nową - czystą. Podmiana odbywa się poprzez specjalnie zaprojektowany chwytak w kształcie płaskich widełek zamontowany na ramieniu robota. Konstrukcja chwytaka pozbawiona jest elementów ruchomych. Wyposażona została natomiast w magnesy oraz kołki pozycjonujące i stabilizujące platformę podczas przenoszenia. Ramiona chwytaka tworzą kąt rozwarty i są zaostrome na końcach. Oderwanie platformy od stołu polega na wsunięciu ostrych końców pomiędzy platformę i stół roboczy drukarki (rys. 4.21). Następnie platforma może zostać przeniesiona do magazynu gotowych wyrobów, stanowisko kontroli jakości lub stanowisko obróbki wykończeniowej. Czysta platforma pobierana jest analogicznie z magazynu platform i instalowana przez robota do stołu roboczego drukarki 3D.



Rys. 4.21. Usuwanie platformy z przestrzeni roboczej drukarki 3D przy pomocy dedykowanego chwytaka

W trakcie badań wykonano próby oderwania platformy roboczej od stołu drukarki 3D i przeniesienie jej poza obszar roboczy, a także próby w zakresie instalacji nowej, pustej platformy na stół roboczy drukarki 3D. Metoda dobrze rokuje w kontekście zastosowania w zautomatyzowanych systemach wytwórczych, szczególnie w środowisku jednorodnych drukarek 3D. Zaletą metody jest w szczególności tylko jednorazowa konieczność zaprogramowania trajektorii ruchu ramienia robota, niezależnie od kształtu, ilości i rozmieszczenia wytwarzanych modeli na platformie roboczej. Ponadto możliwe jest jednoczesne przemieszczanie wszystkich modeli wytworzonych w pojedynczym cyklu na jednej platformie roboczej. Wadą metody jest natomiast konieczność zaprojektowania odpowiedniego chwytaka dla różnych modeli drukarek 3D.

Zestawienie zalet i wad obydwu analizowanych metod przedstawione zostało w tab. 4.2. W wyniku ich analizy, do opracowywanej metodyki automatyzacji wybrano metodę bazującą na chwytaku o konstrukcji dedykowanej.

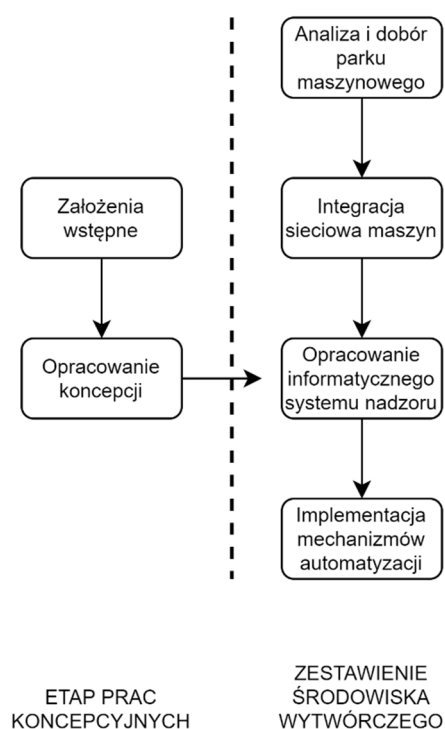
Tab. 4.2. Porównanie zalet i wad metod przenoszenia wytworzonych modeli

Metoda	Zalety	Wady
Przemieszczanie modeli z wykorzystaniem robota z chwytakiem palczastym	<ul style="list-style-type: none"> • Możliwość wykorzystania gotowego rozwiązania z rynku. • Uniwersalne rozwiązanie dla drukarek o zróżnicowanych platformach roboczych. 	<ul style="list-style-type: none"> • Znaczne trudności, a nawet brak możliwości usunięcia pozostałości materiału i fragmentów podpór. • Pogarszanie się powierzchni platformy roboczej z każdym kolejnym wydrukiem. • Pogorszenie jakości wytwarzanych modeli. • Możliwość uszkodzenia modelu podczas transportu. • Konieczność wyznaczania indywidualnej trajektorii oraz ruchu odrywającego dla różnorodnych modeli. • Konieczność przenoszenia osobno każdego modelu - w przypadku druku wielu modeli jednocześnie na jednej platformie.
Przemieszczanie modeli z wykorzystaniem robota z chwytakiem dedykowanym	<ul style="list-style-type: none"> • Jednorazowe programowanie trajektorii robota dla danej drukarki, niezależnie od kształtu, ilości i rozmieszczenia drukowanych modeli. • Możliwość przemieszczenia większej ilości modeli na jednej platformie podczas jednego ruchu. • Brak bezpośredniego kontaktu chwytaka z wytwarzanymi modelami. 	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność zaprojektowania i wykonania indywidualnego chwytaka dla różnych drukarek. • Brak możliwości obsługi różnych drukarek jednym chwytakiem.

4.6. Metodyka automatyzacji

W wyniku przeprowadzonych prac analitycznych i doświadczalnych opracowana została metodyka automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego MEX. W jej obrębie wyróżnić można dwie główne fazy: przygotowawczą oraz wytwórczą. Pierwsza z nich ma na celu zestawienie środowiska wytwórczego. Jej schemat przedstawiony został na rys. 4.22. Fazę rozpoczyna przygotowanie założeń wstępnych dotyczących pożądaných do osiągnięcia zdolności produkcyjnych, limitów technologicznych oraz planowanego stopnia automatyzacji procesu. Kolejne prace koncepcyjne dotyczą określenia typu planowanych do zastosowania maszyn wytwórczych, układów kontroli jakości i przemieszczania gotowych wyrobów. Istotne jest również wykonanie założeń do systemów zarządzania maszynami i materiałami produkcyjnymi. Opracowana koncepcja pozwala na dobór parku maszynowego. Wynikiem

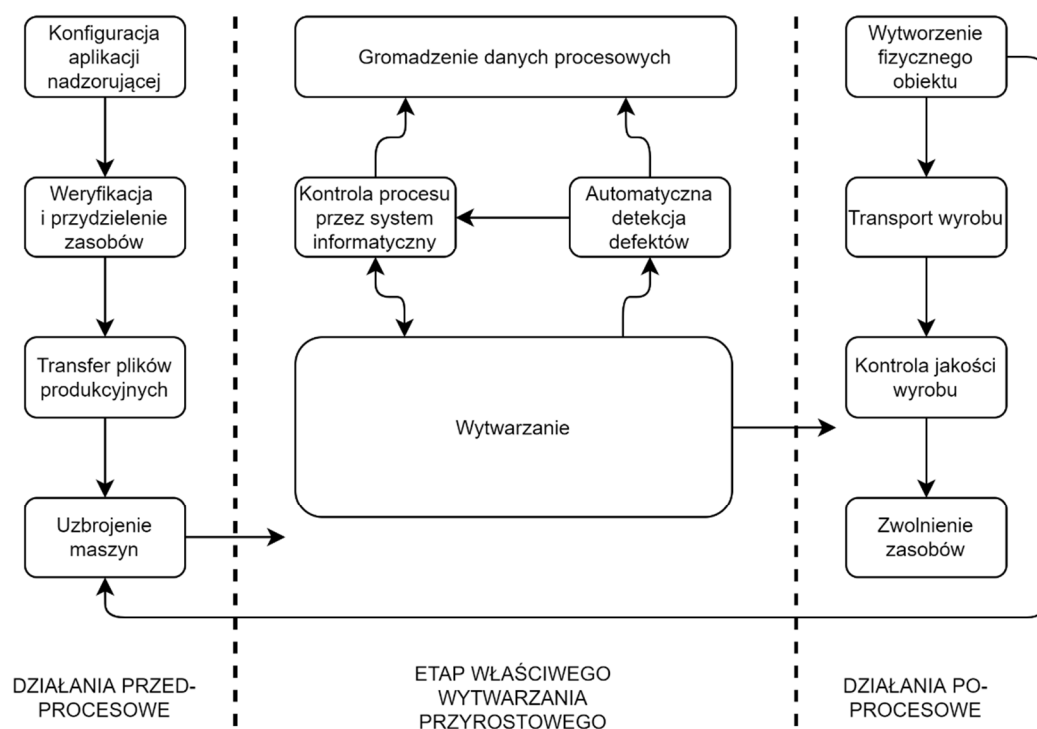
jego analizy jest zestawienie limitów dotyczących możliwych do zastosowania materiałów produkcyjnych, maksymalnych wymiarów wytwarzanych obiektów i szybkości ich wytwarzania. Kolejnym krokiem jest przeprowadzenie integracji sieciowej wybranych urządzeń. Proces ten obejmuje zestawienie funkcji sieciowych oraz opracowanie i implementację protokołów komunikacyjnych i transferu danych z uwzględnieniem metod autoryzacji dostępu. Jednym z kluczowych elementów fazy przygotowawczej jest opracowanie informatycznego systemu nadzoru. Poprawnie zaprojektowany pozwala na sprawne zarządzanie parkiem maszynowym, materiałami produkcyjnymi i przebiegiem procesu wytwarzania. Istotnym jest zaprojektowanie przyjaznego i efektywnego w obsłudze interfejsu użytkownika. Warto więc na tym etapie przeprowadzić analizę wymagań wśród potencjalnych operatorów procesu. Faza przygotowawcza kończy się implementacją mechanizmów automatyzacji takich jak układy kontroli jakości, opcjonalne układy pomiarowe oraz zrobotyzowane układy transportu wyrobów.



Rys. 4.22. Schemat fazy przygotowawczej

Faza wytwarzania dotyczy działań przed i po procesowych oraz właściwego procesu obróbki przyrostowej. Jej schemat przedstawiony został na rys. 4.23. Fazę rozpoczyna przeprowadzenie konfiguracji systemu wytwórczego przez operatora z poziomu aplikacji

komputerowej. Operator wybiera pliki produkcyjne i określa liczbę zadanych do wytworzenia elementów. Zakłada się wcześniejsze przygotowanie plików produkcyjnych poprzez oprogramowanie krojące. Zagadnienia z tym związane jak np. optymalne rozmieszczenie i dostosowana do aktualnych warunków produkcji liczba modeli na platformie roboczej wykraczają poza ramy niniejszej pracy i mogą stanowić dalszy kierunek badań. Po konfiguracji systemu następuje automatyczne przydzielenie zasobów do danego procesu i transfer plików produkcyjnych do odpowiednich urządzeń drogą sieciową. W zależności od stopnia automatyzacji stanowiska wytwórczego uzbrojenie maszyn w platformy robocze dokonuje operator lub układ zrobotyzowany.



Rys. 4.23. Schemat fazy wytwarzania

Podczas etapu wytwarzania właściwego drukarki 3D wraz z pozostałymi urządzeniami pozostają pod kontrolą systemu informatycznego. Wytwarzane obiekty monitorowane są w trybie ciągłym przez algorytmy sztucznej inteligencji w celu detekcji defektów. Monitorowane są również parametry eksploatacyjne drukarek 3D oraz ilość dostępnego materiału produkcyjnego. Dane gromadzone są w centralnej bazie danych. Operator może je zwizualizować z poziomu aplikacji z interfejsem graficznym.

Wyróżnić można dwa tryby wytwarzania zależne od stopnia automatyzacji procesu. Środowisko wytwórcze o drugim stopniu automatyzacji charakteryzuje się tym, że po zakończeniu wytwarzania, fizyczny model wraz z platformą roboczą przenoszony zostaje

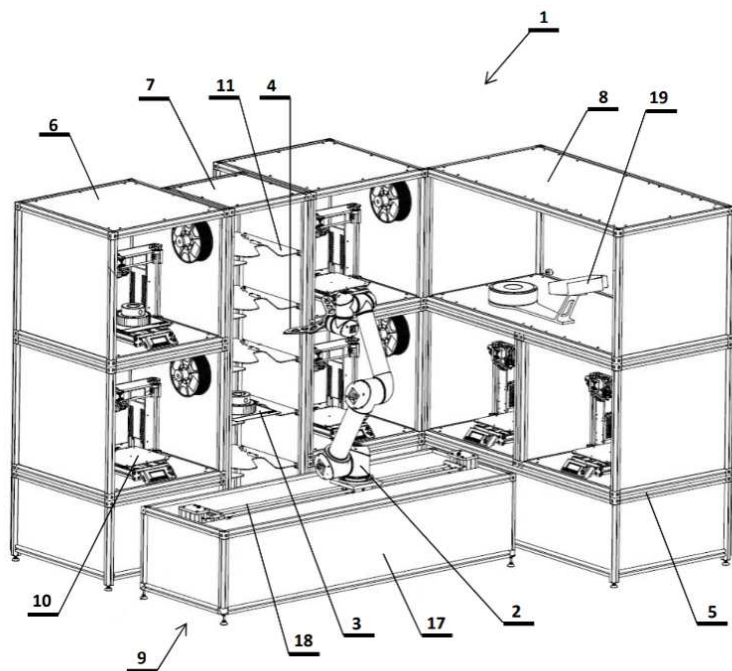
przez zrobotyzowane ramię do magazynu wyrobów gotowych lub do stanowiska kontroli jakości. Następnie robot uezbraja drukarkę 3D w pustą platformę, a system informatyczny realizuje wydruk kolejnego obiektu. W środowisku wytórczym o pierwszym stopniu automatyzacji czynności te wykonywane są manualnie przez operatora.

4.7. Stanowisko badawcze

4.7.1. Koncepcja –zgłoszenie patentowe

W oparciu o przedstawioną metodykę opracowana została koncepcja stanowiska podawczo – sortującego dla elementów drukowanych w układzie wielu drukarek 3D. Na przedmiotowy wynalazek złożony został wniosek o udzielenie ochrony patentowej do Urzędu Patentowego RP 14 maja 2022 roku. Zgłoszenie oznaczone zostało numerem P.441182.

Stanowisko (rys. 4.24) składa się z segmentów drukujących, segmentów podawczo – sortujących, segmentów pomiarowych oraz robota współpracującego poruszającego się na torze jezdny. Poszczególne segmenty zbudowane są w oparciu o aluminiowe profile konstrukcyjne zapewniające odpowiednią sztywność i stabilność konstrukcji. Dzięki temu zapewniona jest modułowość stanowiska oraz możliwość jego budowy w dowolnych konfiguracjach o zmiennej ilości poszczególnych segmentów. Segmenty drukujące wyposażone są w drukarki 3D posiadające magnetyczne stoły robocze oraz układy monitoringu wizyjnego. Robot posiada chwytak o specjalnej konstrukcji do pobierania i odkładania platform roboczych. Platformy te przenoszone są przez robota poruszającego się na torze jezdny pomiędzy poszczególnymi segmentami. Segment podawczo – sortujący posiada płaskie półki z wycięciami odpowiadającymi kształtowi chwytaka oraz ogranicznikami blokującymi ruch platformy na półce. Segment pomiarowy wyposażony jest w urządzenie skanujące geometrię wyprodukowanych elementów. Urządzenie to stanowi element modułu kontroli jakości.



- 1 – stanowisko podawczo – sortujące,
- 2 – robot współpracujący,
- 3 – platforma robocza,
- 4 – specjalistyczny chwytak,
- 5 – rama z konstrukcyjnych profili aluminiowych,
- 6 – segment drukujący,
- 7 – segment podawczo – sortujący,
- 8 – segment pomiarowy,
- 9 – zespół toru jezdnego,
- 10 – urządzenie drukujące,
- 11 – półka,
- 17 – podstawa toru jezdnego,
- 18 – tor jezdny,
- 19 – urządzenie skanujące

Rys. 4.24. Konstrukcja stanowiska podawczo – sortującego

Zgłoszone zastrzeżenia patentowe dotyczą stanowiska podawczo – sortującego znamiennego tym, że:

- Posiada ramę z profili tworzących poszczególne segmenty, pozwalające na budowę modułową, przy czym stanowisko posiada co najmniej jeden segment drukujący, co najmniej jeden segment podawczo – sortujący, co najmniej jeden segment pomiarowy oraz zespół toru jezdnego.
- Chwytak robota ma kształt widłowy z dwoma ramionami o zaokrąglonych końcach. Kształt chwytaka odpowiada kształtowi wycięcia w półkach segmentu podawczo – sortującego.
- Chwytak posiada magnesy oraz kołki pozycjonujące do stabilizacji platformy w trakcie jej usuwania ze stołu roboczego drukarki 3D, jak również w trakcie przenoszenia do miejsca docelowego.
- Zespół toru jezdnego zbudowany jest z podstawy oraz toru jezdnego.
- Segment pomiarowy wyposażony jest w urządzenie skanujące.

4.7.2. Budowa stanowiska

Na podstawie opracowanej metodyki automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego oraz przedstawionej koncepcji stanowiska podawczo – sortującego zaprojektowane i wykonane zostało stanowisko badawcze w postaci zautomatyzowanego środowiska wytwórczego (rys. 4.25). Stanowisko posiada budowę modułową, w jej skład wchodzi

magazyn pustych i zadrukowanych platform roboczych, dwa boksy z drukarkami 3D, robot współpracujący oraz komputer z aplikacją nadzorującą. Konstrukcja, po doposażeniu robota w tor jezdny, cechuje się również skalowalnością. Dzięki temu możliwa jest jej rozbudowa o kolejne moduły magazynów i urządzeń do druku 3D zwiększając jednocześnie zdolności produkcyjne.

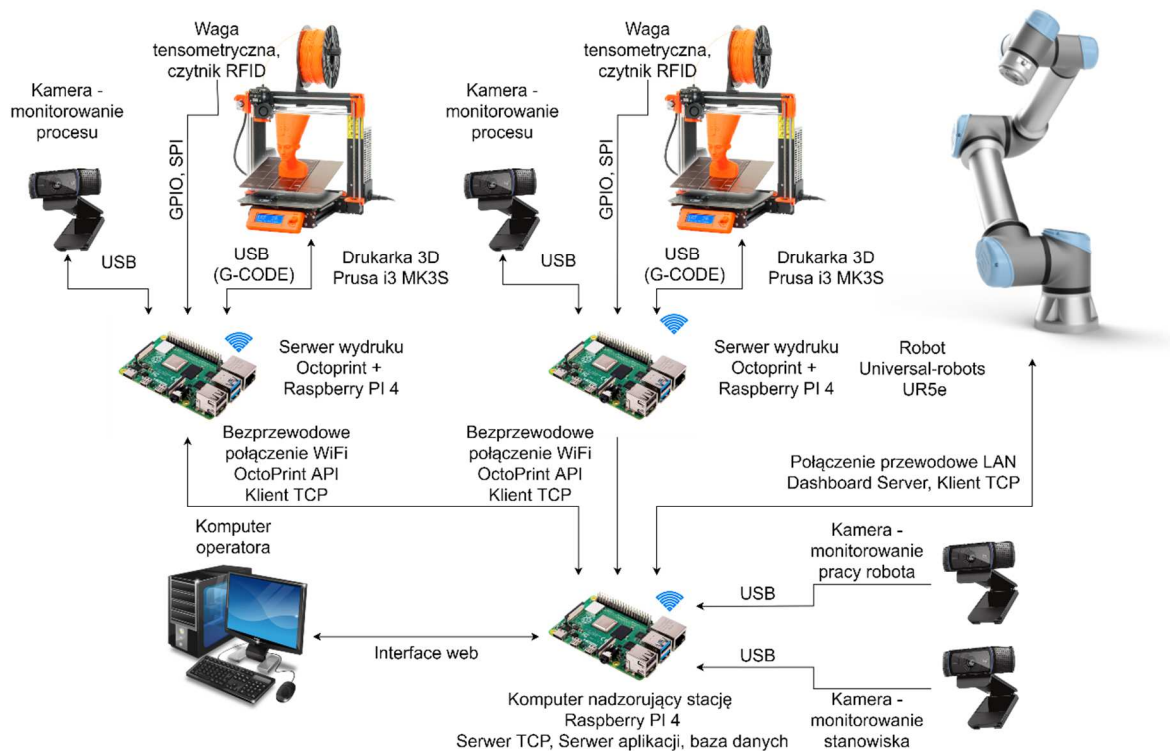


Rys. 4.25. Zautomatyzowana stacja druku 3D – stanowisko badawcze

Architektura sprzętowa zbudowanej stacji przedstawiona została na rys. 4.26. Całością systemu zarządza aplikacja zainstalowana na centralnym komputerze jedнопłytkowym Raspberry Pi. Operator posiada dostęp do aplikacji poprzez interfejs web z dowolnego komputera pracującego w tej samej sieci lokalnej. Do komputera centralnego przyłączone zostały dwie kamery umożliwiające zdalny podgląd przebiegu procesu (pracę robota współpracującego oraz magazyn platform).

Stacja posiada dwa moduły drukujące wyposażone w drukarki Prusa i3 MK3S i komputery jedнопłytkowe Raspberry Pi z zainstalowanymi serwerami wydruku Octoprint. Dzięki takiemu połączeniu funkcjonalność drukarek została rozszerzona została o możliwość zdalnego zarządzania i integracji z nadrzędnym systemem informatycznym zarządzającym pracą stacji. W modułach zainstalowane zostały również kamery do zdalnej obserwacji

wydruku. Transmitowany obraz przetwarzany jest dodatkowo przez algorytm sztucznej inteligencji w celu detekcji defektów w czasie rzeczywistym. Do serwera wydruku przyłączony został również układ monitorujący stan i typ dostępnego filamentu. Monitorowanie stanu odbywa się poprzez przetwarzanie sygnału z wagi tensometrycznej umieszczonej w uchwycie szpuli filamentu. Typ materiału rozpoznawany jest na podstawie odczytu danych z tagu RFID umieszczonego w obudowie szpuli. Boksy posiadają dodatkowo oświetlenie LED o regulowanej barwie sygnalizujące stan pracy drukarki (kolor zielony – wydruk ukończony, żółty – wymagane działanie operatora, czerwony – błąd procesu). Natomiast światło białe wykorzystywane jest do doświetlania wydruków nocą w celu rejestracji obrazu przez kamerę.



Rys. 4.26. Infrastruktura sprzętowa opracowanej stacji druku 3D

Zapewnienie ciągłej produkcji, limitowanej ilością wolnych zasobów (filament, platformy robocze), możliwe jest dzięki zastosowaniu robota współpracującego Universal-Robots UR5e. Robot wyposażony został w zaprojektowany, dedykowany chwytak i wykorzystany został do: odbierania zadrukowanych platform z przestrzeni roboczej drukarki, odkładania platform półek w magazynie, pobierania pustych platform z magazynu i instalacji ich do drukarek 3D.

Do wymiany danych pomiędzy drukarkami 3D i aplikacją nadzorującą wykorzystano połączenie bezprzewodowe WiFi oraz interfejs REST API zaimplementowany w serwerze

wydruku Octoprint. Natomiast komunikacja z robotem zrealizowana została poprzez połączenie przewodowe z wykorzystaniem wbudowanego interfejsu Dashboard Server udostępniającym m.in. komendy w zakresie wyboru i uruchomieniu zaprogramowanych sekwencji ruchów robota. Zarówno drukarki jak i robot po wykonaniu zadania informują o tym fakcie aplikację nadzorującą wykorzystując krótkie wiadomości tekstowe przesyłane poprzez protokół TCP/IP.

Konstrukcja magazynka pozwala na przechowywanie sześciu platform roboczych z wydrukowanymi modelami. Rozstaw półek ustawiony został bazując na maksymalnych wymiarach przestrzeni roboczych drukarek. Znając jednak największą wysokość modeli drukowanych w jednym cyklu produkcyjnym, możliwe jest dostosowanie rozstawu półek co wpływa na zwiększenie pojemności magazynku i liczbę modeli drukowanych bez ingerencji operatora. Dolna część magazynka przeznaczona jest na przechowywanie pustych platform roboczych. Rozstaw półek w tym miejscu jest zminimalizowany i dostosowany do operacji robota ze specjalistycznym chwytakiem do przenoszenia platform. Magazynek ma możliwość doposażenia w koła jezdne. Dzięki temu możliwa jest jego szybka podmiana i transport wykonanych modeli na stanowisko post-processingu.

Obsługa stacji przez operatora wymaga początkowego uzbrojenia drukarek w materiał produkcyjny, tj. założenie szpuli filamentu na specjalistyczny uchwyt, gdzie odbywa się weryfikacja jego typu i dostępnej ilości. Ponadto operator uzbraja magazynek w puste platformy robocze. Ostatnim jego zadaniem jest inicjacja procesu z poziomu aplikacji nadzorującej. Inicjacja polega na wyborze plików produkcyjnych oraz określenia ilości modeli do wykonania.

4.7.3. Aplikacja nadzoru procesu druku 3D

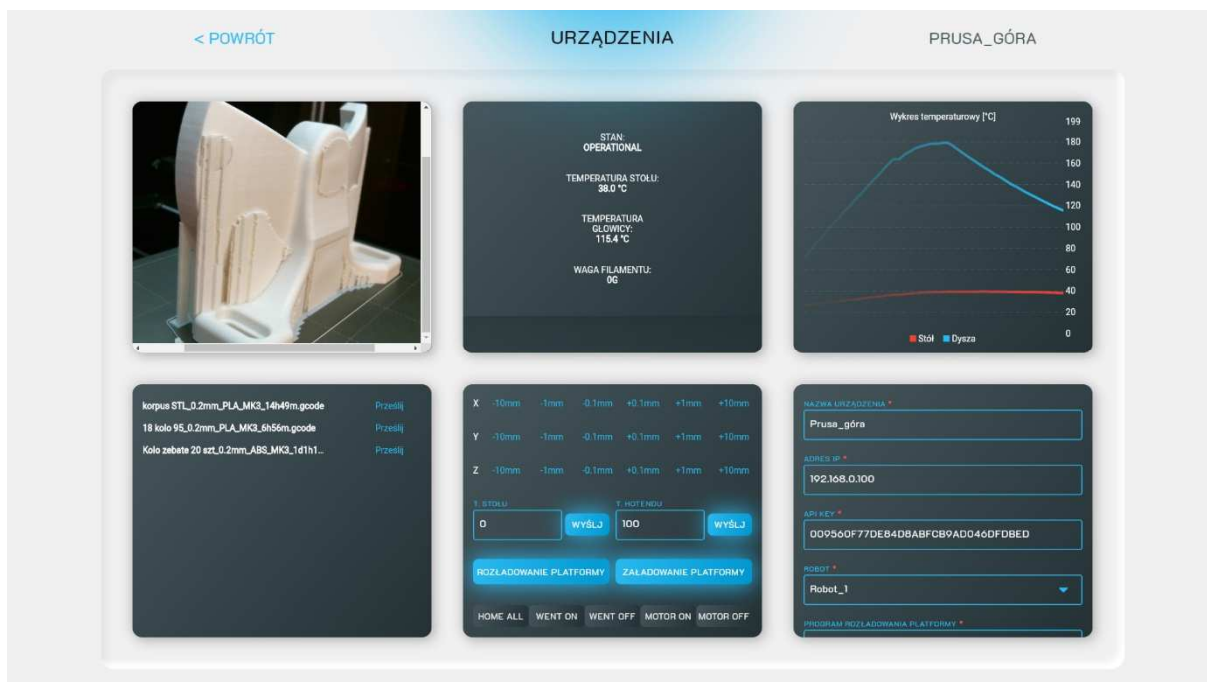
Praca przedstawionej stacji kontrolowana jest przez operatora za pomocą aplikacji komputerowej opracowanej na potrzeby niniejszej pracy. Oprogramowanie to posiada architekturę, w której wyróżnić można dwa główne komponenty: front-end oraz back-end [117], [118]. Pierwszy z nich to interfejs użytkownika, do którego zapewniony został dostęp zdalny z poziomu przeglądarki internetowej z dowolnego komputera w obrębie sieci lokalnej. Okno główne interfejsu (rys. 4.27) prezentuje podstawowe informacje o urządzeniach składowych stacji takich jak drukarki 3D, robot współpracujący oraz magazyn platform i wydrukowanych modeli.



Rys. 4.27. Widok interfejsu użytkownika aplikacji - zakładka "Urządzenia"

Po wybraniu konkretnego urządzenia otwiera się okno ze szczegółowymi informacjami na jego temat z możliwością kontroli ręcznej lub automatycznej. W przypadku urządzenia typu drukarka 3D (rys. 4.28) interfejs dostarcza informacji o aktualnym stanie jej pracy, ilości dostępnego materiału oraz temperatury głowicy i stołu roboczego w formie tekstowej, jak również graficznego wykresu przebiegu zmian w czasie. Ponadto interfejs wzbogacony został o widok obrazu z kamery umieszczonej w komorze roboczej drukarki 3D. Funkcje kontroli ręcznej drukarki obejmują możliwość sterowania ruchami głowicy i jej bazowanie, ustawienie temperatury głowicy i stołu roboczego, blokowanie silników oraz sterowanie pracą wentylatora chłodzącego ekstruder. Praca automatyczna zapewniona została przez realizację zdefiniowanych scenariuszy takich jak instalacja platformy do stołu roboczego drukarki, rozładowanie zadrukowanej platformy oraz transfer pliku produkcyjnego wraz z rozpoczęciem wydruku. W przypadku urządzenia typu robot interfejs dostarcza informacji o aktualnie wybranym programie sekwencji ruchu, stanie wykonywania programu, trybie pracy roboty oraz statusie wewnętrznego systemu bezpieczeństwa. Ponadto użytkownik dysponuje możliwością sterowania pracą robota poprzez wydawanie komend w zakresie uruchomienia zasilania, zwolnienia hamulców serwo mechanizmów, załadowania, uruchomienia i zatrzymania wykonywania wybranych sekwencji ruchu. Dla urządzeń typu magazyn interfejs prezentuje dane odnośnie ilości dostępnych wolnych półek. Po wyborze danej półki użytkownik dostaje informację odnośnie jej stanu (np. czy na półce znajduje się platforma z zadrukowanym modelem, platforma czysta lub półka jest pusta). Dodatkowo

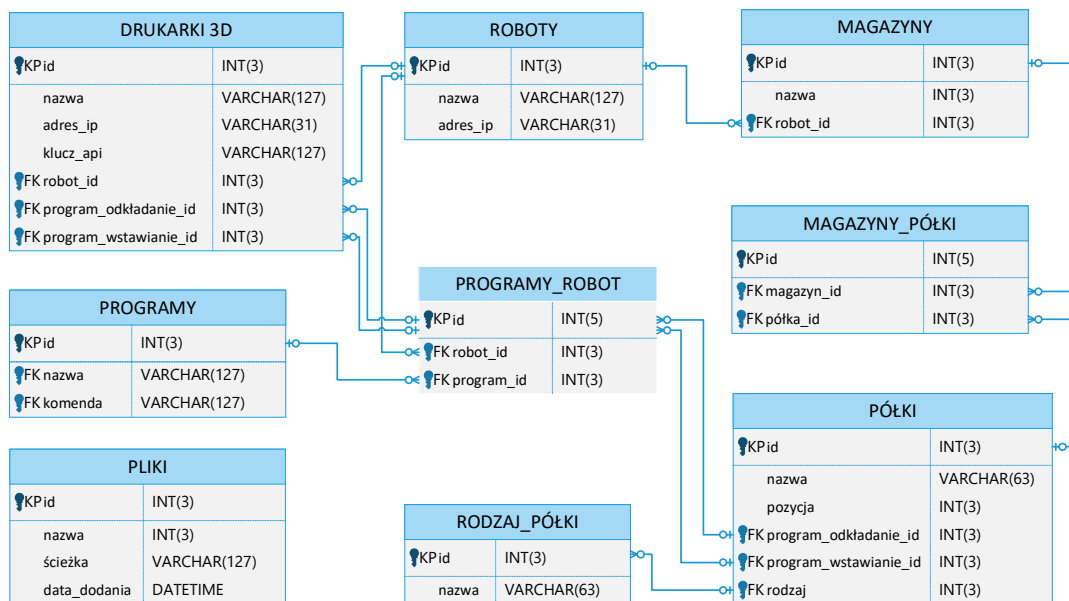
użytkownik ma możliwość uruchomienia programu pobrania czystej platformy lub odłożenia wydrukowanego modelu za pomocą robota.



Rys. 4.28. Widok interfejsu użytkownika aplikacji - zakładka "Drukarka"

Z poziomu interfejsu operator posiada również możliwość przesyłania plików produkcyjnych do serwera, skąd aplikacja rozsyła je samoczynnie do odpowiednich drukarek 3D. Podczas zapisu plików do pamięci serwera użytkownik podaje dane dotyczące czasu trwania wydruku, ilości i typie wymaganego materiału produkcyjnego. Informacje te są niezbędne w celu zapewnienia prawidłowej pracy stacji w trybie produkcji automatycznej.

Drugi komponent składowy oprogramowania to tzw. back-end. Jest to aplikacja działająca w tle na serwerze systemu, która pozwala na realizację algorytmów zaprogramowanych scenariuszy pracy w trybie automatycznym. Scenariusze te polegają np. na wyszukaniu wolnej półki w magazynie i odłożeniu zadrukowanej platformy przez robota w momencie otrzymania komunikatu o zakończeniu procesu druku przez jedną z drukarek. Aby ich realizacja była możliwa, do oprogramowania zaimplementowane zostały protokoły komunikacyjne z poszczególnymi urządzeniami składowymi stacji wytwórczej oraz relacyjna baza danych [119]. Struktura bazy danych oraz relacje zachodzące pomiędzy poszczególnymi jej tabelami przedstawione zostały na rys. 4.29.



Rys. 4.29. Struktura opracowanej bazy danych

Zastosowanie relacyjnej bazy danych pozwala na przechowywanie informacji o konfiguracji parku maszynowego wchodzącego w skład stacji, dzięki czemu jej architektura staje się otwarta i cechuje się skalowalnością. Dodawanie nowych urządzeń odbywa się z poziomu interfejsu użytkownika (rys. 4.30). W trakcie tego procesu użytkownik podaje podstawowe dane dotyczące urządzenia jak np. adres IP drukarki 3D lub robota, wymagane klucze dostępowe do protokołów komunikacyjnych czy też nazwy programów do wykonywania odpowiednich sekwencji ruchów robota w celu np. usunięcia platformy roboczej ze stołu drukarki 3D.

URZĄDZENIA

DRUKARKA ROBOT MAGAZYN

NAZWA URZĄDZENIA * Prusa i3 MK3S

ADRES IP * 192.168.0.100

API KEY * AC128271BDE91FA231EEA21

ROBOT * Robot_1

PROGRAM POBRANIA PLATFORMY * Drukarka_1_odbior_platfomy

PROGRAM ODKŁADANIA PLATFORMY * Drukarka_1_instalacja_platfomy

DALEJ

Rys. 4.30. Okno dialogowe dodawania nowych urządzeń z poziomu interfejsu użytkownika

5. BADANIA WPŁYWU AUTOMATYZACJI

W celu weryfikacji zasadności opracowanej metodyki automatyzacji przeprowadzono szereg badań nad wpływem jej wdrożenia w proces produkcji. Badania miały charakter obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych w wariantach o zróżnicowanych pod względem liczby drukarek 3D zespołach produkcyjnych, różnych wytwarzanych elementach i liczbie sztuk w danej partii. Metody symulacyjne dostarczają cennych informacji umożliwiających dogłębną analizę przebiegu procesów produkcyjnych [120]. Wykorzystanie komputerów do ich przeprowadzenia pozwala na uzyskanie wyników obliczeń w szybkim tempie. Zaletą prowadzenia badań symulacyjnych w środowisku wirtualnym jest również redukcja czasu i kosztów w stosunku do technik eksperymentalnych. Jest to szczególnie istotne, gdy wykonanie rzeczywistego eksperymentu absorbuje znaczną ilość czasu lub generuje wysokie koszty [121]. Ponadto metody symulacyjne zapewniają powtarzalność wyników w przypadku konieczności ich powtórzenia przy zachowaniu tych samych warunków i danych wejściowych. Niweluje to również błędy i zakłócenia związane z czynnikami zewnętrznymi [122].

5.1. Metodyka prowadzenia badań

Celem prowadzenia badań symulacyjnych było porównanie przebiegu procesu wytwarzania w trzech trybach pracy: konwencjonalnym oraz dwóch zautomatyzowanych (automatyzacja I i II stopnia). Analiza wyników prowadzona była głównie pod kątem kosztów wytwarzania i czasu pracy operatora – możliwych do zredukowania poprzez zastosowanie mechanizmów automatyzacji. Badania rozpoczęto od wyboru zróżnicowanych modeli 3D, których parametry wykorzystano do opracowania planów wytwarzania dla poszczególnych procesów. Na ich podstawie określone zostały łączne liczby wydruków wymaganych do wykonania na poszczególnych drukarkach 3D. Ponadto plany zawierają informacje odnośnie liczby i rozmiaru wykorzystanych szpul filamentu oraz momentów ich wymiany. Na ich podstawie powstała też charakterystyka plików produkcyjnych z informacją o wymaganej liczbie modeli na platformie roboczej. Parametry wyjściowe symulacji obliczane były zgodnie z zależnościami przedstawionymi w dalszej części rozdziału.

5.1.1. Opis przebiegu procesu wytwarzania w trybie konwencjonalnym

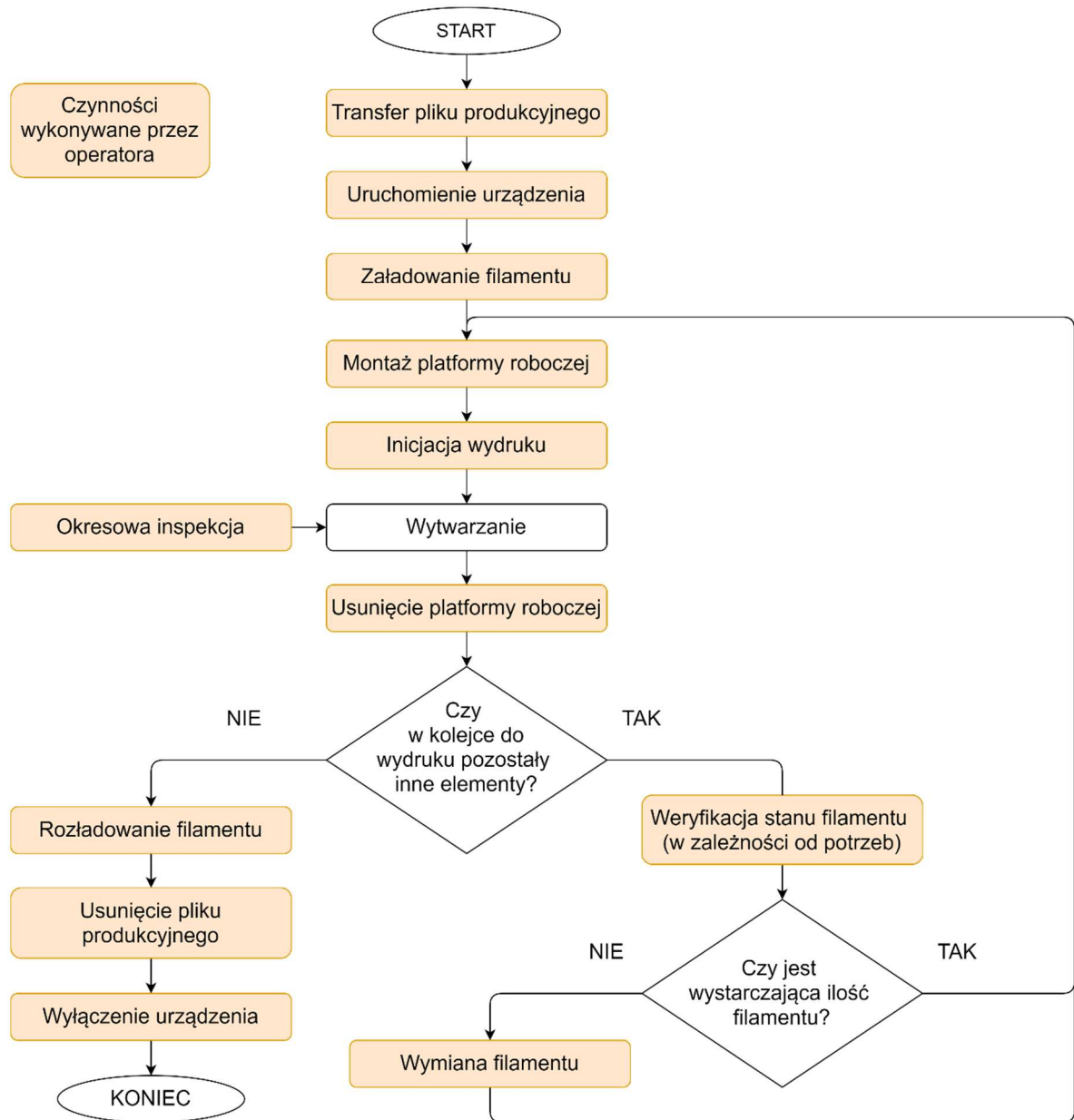
Drukarki 3D w konwencjonalnym trybie wytwarzania bez elementów automatyzacji stanowią zespół nie powiązanych ze sobą maszyn. Obsługiwane są manualnie i pojedynczo przez operatora. Schemat przebiegu procesu przedstawiony został na rys. 5.1. Do zadań

operatora należy: przygotowanie maszyn do procesu, wymiana platform i szpul filamentu w trakcie procesu oraz inspekcja przebiegu procesu. Przygotowanie maszyn do procesu rozpoczyna się od wygenerowania i przekopiowania pliku produkcyjnego na nośnik pamięci w postaci karty SD. Następnie operator włącza zasilanie urządzenia i rozgrzewa ekstruder do temperatury umożliwiającej załadowanie filamentu. Podczas nagrzewania operator montuje kartę pamięci do gniazda sterownika, pustą platformę do stołu roboczego drukarki 3D oraz szpulę filamentu do uchwytu. Po rozgrzaniu ekstrudera operator ładuje filament i inicjuje pierwszy wydruk z poziomu fizycznego panelu drukarki 3D. Następnie przedstawione czynności wykonywane są analogicznie dla pozostałych drukarek 3D.

W trakcie procesu wytwarzania operator ma za zadanie wykonać określoną liczbę inspekcji każdego modelu. Inspekcja wymaga fizycznej obecności operatora przy drukarce 3D i polega na ocenie poprawności przebiegu procesu wytwarzania. Operator na podstawie własnej wiedzy i doświadczenia weryfikuje wzrokowo wystąpienie defektów wydruku lub stan zacięcia filamentu. Jego zadaniem jest również odczyt wskazań temperatury ekstrudera i stołu roboczego oraz porównanie z parametrami zadanymi w danym procesie.

Po zakończeniu pojedynczego wydruku, jeśli dla danej drukarki 3D zaplanowany został wydruk kolejny, następuje jego ponowienie. W najprostszym wariancie czynność ta zakłada pobranie pustej platformy z magazynu, demontaż zadrukowanej platformy ze stołu roboczego drukarki 3D, instalację pustej platformy na stole roboczym, odniesienie zadrukowanej platformy do magazynu oraz odnotowanie czynności przez operatora. Proces ten może zostać rozbudowany o czynności związane z obsługą filamentu. Zakłada się wykonywanie określonej liczby weryfikacji ilości filamentu załadowanego do drukarki. Liczba weryfikacji dla danej szpuli zależy od jej wagi, przyjęto wykonanie jednego pomiaru na 0,5 kg zużytego materiału. Czynność ta polega na ściągnięciu szpuli z uchwytu, zważeniu jej, odjęciu wagi pustej szpuli oraz zanotowaniu wyników. Wykonanie weryfikacji ilości dostępnego filamentu umożliwia ocenę poprawności przebiegu procesu w ujęciu całościowym oraz podjęcie odpowiednio wcześniej działań zaradczych. Trzeci wariant ponowienia wydruku występuje w momencie gdy ilość dostępnego materiału jest zbyt niska do wykonania kolejnego wydruku. W tym wypadku operator ma za zadanie dodatkowo wymienić szpulę filamentu. Wymiana rozpoczyna się od rozgrzania ekstrudera. W tym czasie operator odcina nitkę filamentu i dokonuje pomiaru wagi zużytej szpuli w celach ewidencyjnych. Następnie odkłada zużytą szpulę do magazynu i pobiera nową. Operator montuje nową szpulę na uchwyt i ładuje filament do ekstrudera.

Po wykonaniu wszystkich wydruków zaplanowanych dla danej drukarki 3D operator wykonuje czynności związane z zakończeniem pracy z urządzeniem. Czynności te obejmują rozładowanie filamentu, ewidencję wagi szpuli materiału, przeniesienie zużytej szpuli i zadrukowanej platformy do magazynu, usunięcie pliku produkcyjnego z pamięci urządzenia oraz wyłączenie jego zasilania.



Rys. 5.1. Schemat przebiegu procesu w standardowym trybie nieautomatyzowanym

Czas pracy operatora w trakcie procesu wytwarzania obliczony został na podstawie opracowanych zależności. Łączny czas jego pracy (5.1) stanowi sumę czasu wykonywania poszczególnych czynności (5.2 – 5.9).

- Czas pracy operatora:

$$T_{OP-KONWENCJONALNY} = T_{GPP} + T_{OPP} + T_{WPR} + T_{WSF} + T_{OMD} + T_{IP} + T_{WIF} + T_{PPS}, \quad (5.1)$$

gdzie:

T_{GPP} – czas generacji plików produkcyjnych,

T_{OPP} – czas obsługi plików produkcyjnych,

T_{WPR} – czas wymiany platform roboczych,

T_{WSF} – czas wymiany szpul filamentu,

T_{OMD} – czas ręcznej obsługi menu drukarki,

T_{IP} – czas inspekcji procesu wytwarzania,

T_{WIF} – czas weryfikacji ilości filamentu,

T_{PPS} – czas przejść i powrotów ze stanowiska.

- Czas generacji plików produkcyjnych – łączny czas potrzebny na wygenerowanie plików produkcyjnych wykorzystywanych w procesie wytwarzania z wykorzystaniem oprogramowania krojącego.

$$T_{GPP} = I_{PP} * t_{GPP}, \quad (5.2)$$

gdzie:

I_{PP} – liczba różnych plików produkcyjnych zastosowanych w procesie,

t_{GPP} – czas wygenerowania pojedynczego pliku produkcyjnego.

- Czas obsługi plików produkcyjnych – łączny czas przenoszenia plików produkcyjnych na nośniku pamięci do wszystkich wykorzystanych w procesie wytwarzania drukarek 3D, wraz z późniejszym ich usuwaniem.

$$T_{OPP} = 2 * I_D * t_{OPP}, \quad (5.3)$$

gdzie:

I_D – liczba wykorzystanych drukarek 3D w procesie wytwarzania,

t_{OPP} – czas pojedynczej operacji (przenoszenie, usuwanie) na pliku produkcyjnym.

- Czas wymiany platform roboczych – łączny czas wymiany platform roboczych w drukarkach 3D.

$$T_{WPR} = I_W * t_{WPR}, \quad (5.4)$$

gdzie:

I_W – liczba wykonanych wydruków,

t_{WPR} – czas wykonania pojedynczej wymiany platformy (uwzględnia przenoszenie platformy z wytworzonymi modelami do magazynu).

- Czas wymiany szpul filamentu – łączny czas wymiany szpul filamentu, uwzględnia początkowe uzbrojenie drukarki w nową szpulę oraz końcowe rozładowanie.

$$T_{WSF} = I_{SF} * t_{WSF}, \quad (5.5)$$

gdzie:

I_{SF} – liczba wykorzystanych szpul filamentu,

t_{WSF} – czas wykonania pojedynczej wymiany wymiany szpuli filamentu.

- Czas ręcznej obsługi menu drukarek 3D – łączny czas ręcznej obsługi menu drukarek 3D podczas inicjacji wydruku, rozgrzewania ekstrudera do wymiany szpuli filamentu oraz w celu włączenia / wyłączenia zasilania.

$$T_{OMD} = (I_W + I_{SF} + 2 * I_D) * t_{OMD}, \quad (5.6)$$

gdzie:

I_W – liczba wykonanych wydruków,

I_D – liczba wykorzystanych drukarek 3D w procesie wytwarzania,

I_{SF} – liczba wykorzystanych szpul filamentu,

t_{OMD} – czas wykonania pojedynczej operacji z wykorzystaniem menu drukarki 3D.

- Czas inspekcji procesu wytwarzania – łączny czas trwania inspekcji wykonywanych przez operatora.

$$T_{IP} = I_W * i_{IP} * t_{IP}, \quad (5.7)$$

gdzie:

I_W – liczba wykonanych wydruków,

i_{IP} – założona liczba inspekcji w trakcie pojedynczego wydruku,

t_{IP} – czas wykonania pojedynczej inspekcji wydruku.

- Czas weryfikacji ilości filamentu – łączny czas trwania weryfikacji ilości filamentu w trakcie wydruku oraz po wymianie szpuli w celach ewidencyjnych.

$$T_{WIF} = (I_F * i_{WIF} + I_{SF}) * t_{WIF}, \quad (5.8)$$

gdzie:

I_F – ilość wykorzystanego filamentu [kg],

i_{WIF} – założona liczba weryfikacji filamentu na 1 kg zużytego materiału,

I_{SF} – liczba wykorzystanych szpul filamentu,

t_{WIF} – czas wykonania pojedynczej operacji weryfikacji ilości materiału.

- Czas przejść i powrotów ze stanowiska – łączny czas potrzebny na przejście i powrót ze stanowiska wytwarzania. Uwzględnione zostały przejścia w celu: uzbrojenia maszyn przed rozpoczęciem procesu, wymian platformy lub rozbrojenia maszyn po zakończeniu procesu oraz inspekcji procesu wytwarzania.

$$T_{PPS} = [1 + (I_{D-MAX} * (1 + i_{IP}))] * t_{PPS}, \quad (5.9)$$

gdzie:

I_{D-MAX} – największa liczba wydruków wykonanych na drukarce 3D,

i_{IP} – założona liczba inspekcji w trakcie pojedynczego wydruku,

t_{PPS} – czas przejścia i powrotu ze stanowiska wytwarzania.

Czasy poszczególnych czynności (tab. 5.1) zmierzone zostały podczas eksperymentów z wykorzystaniem drukarek Prusa i3 MK3 dostępnych w Laboratorium Szybkiego Prototypowania. Czas przejścia i powrotu ze stanowiska założony został na podstawie czasu potrzebnego do pokonania drogi pomiędzy pokojem pracowników technicznych a salą laboratoryjną.

Tab. 5.1. Czas trwania poszczególnych czynności operatora w trybie pracy manualnej

Lp.	Czynność	Czas [mm:sss]	Oznaczenie
1	Wygenerowania pojedynczego pliku produkcyjnego	1:23	t_{GPP}
2	Operacja na pliku produkcyjnym	0:47	t_{OPP}
3	Wymiana platformy roboczej	1:04	t_{WPR}
4	Wymiana szpuli filamentu	2:41	t_{WSF}
5	Operacja z wykorzystaniem menu drukarki 3D	0:14	t_{OMD}
6	Inspekcja procesu wydruku	0:51	t_{IP}
7	Weryfikacja ilości filamentu	1:12	t_{WIF}
9	Przejście i powrót do stanowiska	5:00	t_{PPS}

Jako godzinny koszt pracy parku maszynowego (5.10) w tradycyjnym trybie pracy przyjęto koszt pracy samych drukarek 3D. Koszt ten zależy jest od ilości drukarek 3D w zespole produkcyjnym, zużywanej przez maszyny energii, amortyzacji maszyn oraz ich serwisu.

- Godzinny koszt pracy parku maszynowego:

$$K_{godz_{PM-KONWENCJONALNY}} = K_{godz_D}, \quad (5.10)$$

gdzie:

K_{godz_D} – godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D.

- Godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D:

$$K_{godz_D} = k_{godz_D} * I_D, \quad (5.11)$$

gdzie:

k_{godz_D} – godzinny koszt pracy pojedynczej drukarki 3D,

I_D – liczba wykorzystanych drukarek 3D.

- Godzinny koszt pracy drukarki 3D:

$$k_{godz_D} = k_{godz_{D-AMORTYZACJA}} + k_{godz_{D-ENERGIA}} + k_{godz_{D-SERWIS}}, \quad (5.12)$$

gdzie:

$k_{godz_{D-AMORTYZACJA}}$ – koszt amortyzacji zakupu drukarki 3D w założonym czasie w przeliczeniu na godzinę pracy,

$k_{godz_{D-ENERGIA}}$ – koszt zużycia energii elektrycznej w przeliczeniu na godzinę pracy,

$k_{godz_{D-SERWIS}}$ – koszt koniecznych serwisów i przeglądów w przeliczeniu na godzinę pracy.

- Koszt amortyzacji drukarki 3D:

$$k_{godz_{D-AMORTYZACJA}} = \frac{k_d}{t_{amortyzacji}}, \quad (5.13)$$

gdzie:

k_d – koszt zakupu drukarki 3D,

$t_{amortyzacji}$ – założony czas zwrotu kosztów zakupu drukarki 3D.

- Koszt zużycia energii przez drukarkę 3D:

$$k_{godz_{D-ENERGIA}} = \frac{P_D}{1000} * k_{1kWh} * k_{dystrybucji}, \quad (5.14)$$

gdzie:

P_D – średnia moc pobierana przez drukarkę [W],

k_{1kWh} – koszt 1 kWh energii w taryfie dla przedsiębiorców,

$k_{dystrybucji}$ – współczynnik kosztów dystrybucji.

- Koszt obsługi serwisowej drukarki 3D:

$$k_{godz_{D-SERWIS}} = \frac{t_{serwisu} * k_{op} + K_{części}}{T_{serwisu}} + \frac{t_{przeglądu} * k_{op} + K_{materiału}}{T_{przeglądu}}, \quad (5.15)$$

gdzie:

$t_{serwisu}$ – czas wykonania prac serwisowych [godz],

k_{OP} – koszt godziny pracy operatora [zł/godz],

$K_{części}$ – koszt części wymiennych [zł],

$T_{serwisu}$ – interwał serwisu [godz],

$T_{przeglądu}$ – czas wykonania prac serwisowych [godz],

$K_{materiały}$ – koszt zużytych materiałów [zł],

$T_{przeglądu}$ – interwał serwisu [godz].

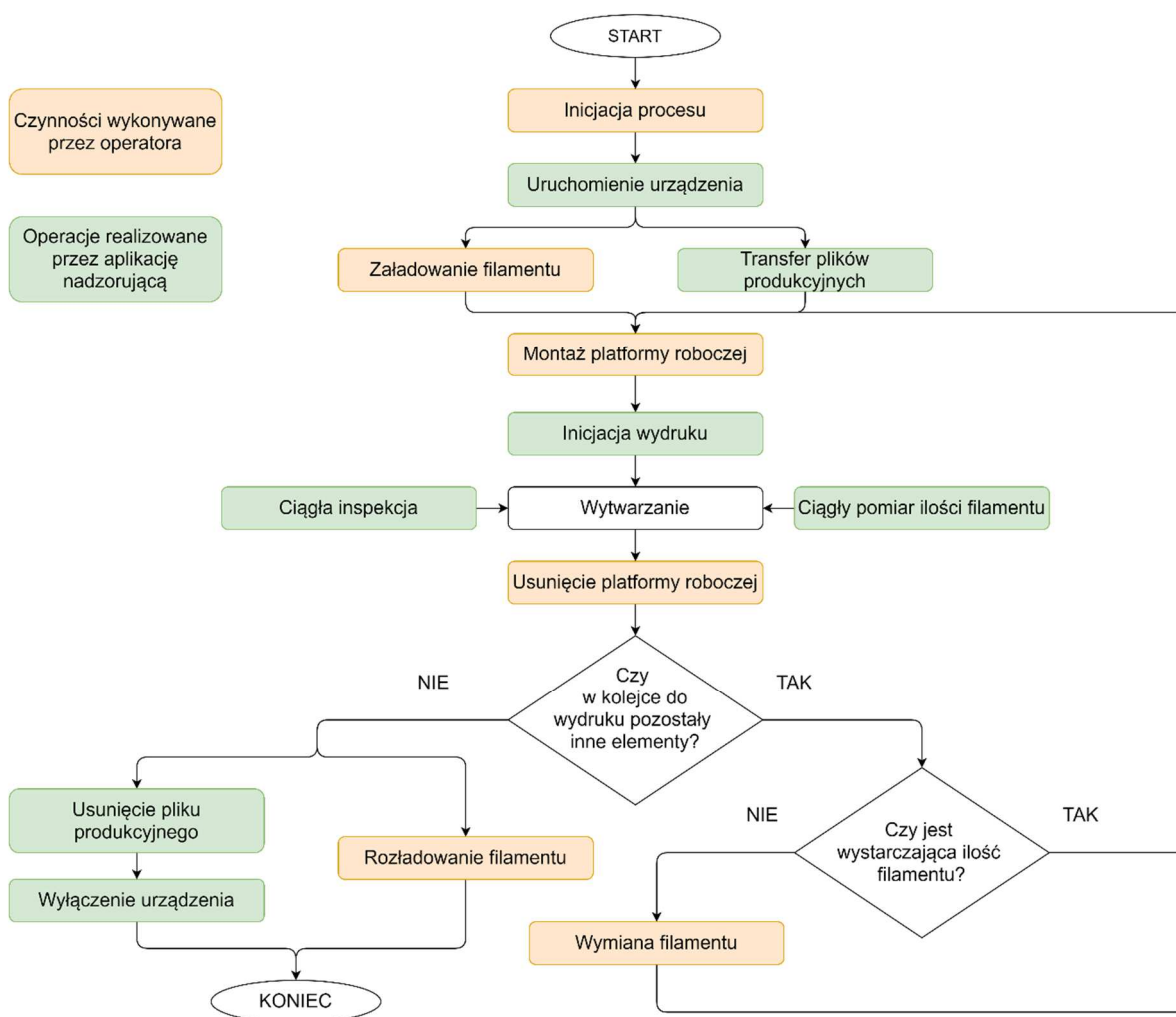
5.1.2. Opis przebiegu procesu w trybie z pierwszym stopniem automatyzacji

Drukarki 3D stanowią strukturę połączonych sieciowo urządzeń kontrolowanych w sposób zdalny przez operatora za pośrednictwem systemu informatycznego. Urządzenia do druku 3D wyposażone zostały w mechanizmy i funkcjonalność zapewniającą pewien stopień automatyzacji. Jednym z nich jest wyposażenie drukarek 3D w serwer wydruku cechujący się możliwością zdalnej kontroli drukarki i monitorowania jej parametrów, transferu plików produkcyjnych oraz inicjacji wydruków. Weryfikacja poprawności przebiegu realizowana jest poprzez zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji do detekcji defektów wydruku na podstawie obrazu z kamery monitorującej stół roboczy drukarki 3D. Weryfikacja ilości dostępnego materiału odbywa się na bieżąco poprzez zastosowanie wagi tensometrycznej w uchwycie szpuli filamentu. Kontrola zasilania drukarek 3D realizowana jest poprzez przekaźnik sterowany w sposób zdalny. Do zadań operatora należy przygotowanie systemu do rozpoczęcia pracy oraz późniejsza wymiana platform i szpul filamentu w drukarkach 3D.

Rozpoczęcie pracy polega na konfiguracji systemu z poziomu aplikacji komputerowej, w tym m.in. wybranie urządzeń oraz plików produkcyjnych wykorzystanych do procesu. Wybrane drukarki 3D uruchamiają się automatycznie. Nadrzędna aplikacja kontroluje rozgrzewanie się ekstruderów. W tym czasie operator uzbraja urządzenia w puste platformy robocze oraz nowe szpule filamentu.

Po zakończeniu pojedynczego wydruku, jeśli dla danej drukarki 3D zaplanowany został wydruk kolejny, następuje jego ponowienie. Wyróżnić można dwa warianty ponowienia wydruku. W pierwszym operator jedynie pobiera czystą platformę z magazynu, demontuje zadrukowaną platformę ze stołu roboczego, instaluje w jej miejsce czystą platformę, a zadrukowaną odkłada do magazynu. Wariant drugi uwzględnia dodatkowo wymianę filamentu. Przy czym proces ten jest uproszczony ze względu na automatyczną kontrolę rozgrzewania ekstrudera przez aplikację nadzorującą.

Po wykonaniu wszystkich wydruków zaplanowanych dla danej drukarki 3D operator wykonuje czynności związane z zakończeniem pracy z urządzeniem. Część z nich zostaje zautomatyzowana, jak np. rozładowanie filamentu, ewidencję wagi szpuli materiału oraz wyłączenie zasilania. Zadaniem operatora jest jedynie przeniesienie zużytej szpuli materiału oraz zadrukowanej platformy do magazynu.



Rys. 5.2. Schemat przebiegu procesu w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji

Łączny czas pracy operatora w procesie wytwarzania z wykorzystaniem pierwszego stopnia automatyzacji (5.16) stanowi sumę czasu poszczególnych operacji (zależności od 5.17 do 5.21).

Czas pracy operatora:

$$T_{OP-AUTO 1} = T_{GPP} + T_{WPR} + T_{WSF} + T_{OA} + T_{PPS}, \quad (5.16)$$

gdzie:

T_{GPP} – czas generacji plików produkcyjnych,

T_{WPR} – czas wymiany platform roboczych,

T_{WSF} – czas wymiany szpul filamentu,

T_{OA} – czas obsługi aplikacji,

T_{PPS} – czas przejść i powrotów ze stanowiska.

- Czas generacji plików produkcyjnych – łączny czas potrzebny na wygenerowanie plików produkcyjnych wykorzystywanych w procesie wytwarzania z wykorzystaniem oprogramowania krojącego.

$$T_{GPP} = I_{PP} * t_{GPP}, \quad (5.17)$$

gdzie:

I_{PP} – liczba różnych plików produkcyjnych zastosowanych w procesie,

t_{GPP} – czas wygenerowania pojedynczego pliku produkcyjnego.

- Czas wymiany platform roboczych – łączny czas wymiany platform roboczych w drukarkach 3D.

$$T_{WPR} = I_W * t_{WPR}, \quad (5.18)$$

gdzie:

I_W – liczba wykonanych wydruków,

t_{OPP} – czas wykonania pojedynczej wymiany platformy (uwzględnia przenoszenie do magazynu).

- Czas wymiany szpul filamentu – łączny czas wymiany szpul filamentu, uwzględnia początkowe uzbrojenie drukarki w nową szpulę oraz końcowe rozładowanie.

$$T_{WSF} = I_{SF} * t_{WSF}, \quad (5.19)$$

gdzie:

I_{SF} – liczba wykorzystanych szpul filamentu,

t_{WSF} – czas wykonania pojedynczej wymiany wymiany szpuli filamentu.

- Czas obsługi aplikacji – czas łączny interakcji operatora z aplikacją. Uwzględniony został czas potrzebny na konfigurację systemu do pracy, potwierdzenia wykonania wymian platformy i szpul filamentu przez operatora.

$$T_{OA} = (I_W + I_{SF}) * t_{OA} + t_{KS}, \quad (5.20)$$

gdzie:

I_W – liczba wykonanych wydruków,

I_{SF} – liczba wykorzystanych szpul filamentu,

t_{OA} – czas wykonania pojedynczego potwierdzenie wymiany platformy z poziomu interfejsu aplikacji mobilnej,

t_{KS} – czas konfiguracji systemu z poziomu interfejsu aplikacji.

- Czas przejść i powrotów ze stanowiska – łączny czas potrzebny na przejście i powrót ze stanowiska wytwarzania. Uwzględnione zostały przejścia w celu: uzbrojenia maszyn przed rozpoczęciem procesu oraz wymian platformy lub rozbrojenia maszyn po zakończeniu procesu wytwarzania.

$$T_{PPS} = (1 + I_{D-MAX}) * t_{PPS}, \quad (5.21)$$

gdzie:

I_{D-MAX} – największa liczba wydruków wykonanych na drukarce 3D,

i_{IP} – założona liczba inspekcji w trakcie pojedynczego wydruku,

t_{PPS} – czas przejścia i powrotu ze stanowiska wytwarzania.

Czasy wykonywania poszczególnych operacji (tab. 5.2) wyznaczone zostały na podstawie pomiarów dokonanych w warunkach rzeczywistych przy wykorzystaniu opracowanego stanowiska badawczego.

Tab. 5.2. Czas trwania poszczególnych czynności operatora w trybie pracy sieciowej

Lp.	Czynność	Czas [mm:sss]	Oznaczenie
1	Wygenerowania pojedynczego pliku produkcyjnego	1:23	t_{GPP}
2	Obsługa aplikacji	0:11	t_{OPP}
3	Wymiana platformy roboczej	1:04	t_{WPR}
4	Wymiana szpuli filamentu	1:37	t_{WSF}
5	Przejście i powrót do stanowiska	5:00	t_{PPS}

Zależności 5.22 do 5.27 prezentują metodę wyznaczenia godzinnego kosztu pracy parku maszynowego. W trybie wytwarzania w środowisku z pierwszym stopniem automatyzacji uwzględniono dodatkowo koszt utrzymania infrastruktury sieciowej.

- Godzinny koszt pracy parku maszynowego:

$$K_{godz_{PM-AUTO 1}} = K_{godz_D} + K_{godz_{IS}}, \quad (5.22)$$

gdzie:

K_{godz_D} – godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D liczony analogicznie jak w konwencjonalnym trybie pracy,

$K_{godz_{IS}}$ – godzinny koszt pracy infrastruktury sieciowej.

- Godzinny koszt pracy infrastruktury sieciowej:

$$Kgodz_D = kgodz_{IS-AMORTYZACJA} + kgodz_{IS-ENERGIA} + kgodz_{IS-SERWIS} + kgodz_{IS-APLIKACJA}, \quad (5.23)$$

gdzie:

$kgodz_{IS-AMORTYZACJA}$ – koszt amortyzacji zakupu infrastruktury sieciowej w założonym czasie w przeliczeniu na godzinę pracy,

$kgodz_{IS-ENERGIA}$ – koszt zużycia energii elektrycznej w przeliczeniu na godzinę pracy,

$kgodz_{IS-SERWIS}$ – koszt obsługi serwisowej,

$kgodz_{IS-APLIKACJA}$ – koszt abonamentu za wykorzystanie aplikacji nadzorującej.

- Koszt amortyzacji infrastruktury sieciowej:

$$kgodz_{IS-AMORTYZACJA} = \frac{k_{IS}}{t_{amortyzacji}}, \quad (5.24)$$

gdzie:

k_{IS} – koszt zakupu infrastruktury sieciowej,

$t_{amortyzacji}$ – założony czas zwrotu kosztów zakupu infrastruktury sieciowej i elementów automatyzacji.

- Koszt zakupu infrastruktury sieciowej i elementów automatyzacji

$$k_{IS} = k_{IS-SWITCH} + k_{IS-LAPTOP} + k_{IS-S.APLIKACJI} + I_D * (k_{IS-S.WYDRUKU} + k_{IS-KAMERA} + k_{IS-UCHWYT} + k_{IS-PRZEKAŹNIK}), \quad (5.25)$$

gdzie:

$k_{IS-SWITCH}$ – koszt zakupu przełącznika sieciowego,

$k_{IS-LAPTOP}$ – koszt zakupu laptopa,

$k_{IS-S.APLIKACJI}$ – koszt zakupu serwera aplikacji,

$k_{IS-S.WYDRUKU}$ – koszt zakupu serwera wydruku,

$k_{IS-KAMERA}$ – koszt zakupu kamery monitorującej,

$k_{IS-IS.UCHWYT}$ – koszt zakupu uchwytu szpuli filamentu wyposażonej w wagę,

$k_{IS-PRZEKAŹNIK}$ – koszt zakupu przekaźnika zasilania,

I_D – ilość drukarek 3D.

- Koszt zużycia energii przez infrastrukturę sieciową:

$$kgodz_{IS-ENERGIA} = \frac{P_{SWITCH} + P_{LAPTOP} + P_{S.APLIKACJI} + P_{S.WYDRUKU} * I_D}{1000} * k_{1kWh} * k_{dystrybucji}, \quad (5.26)$$

gdzie:

P_{SWITCH} – średnia moc pobierana przez przełącznik sieciowy [W],

P_{LAPTOP} – średnia moc pobierana przez laptop [W],

$P_{S.APLIKACJI}$ – średnia moc pobierana przez serwer aplikacji [W],

$P_{S.WYDRUKU}$ – średnia moc pobierana przez serwer wydruku i elementy automatyzacji (kamera, uchwyt z wagą, przełącznik zasilania) [W],

I_D – ilość drukarek 3D,

k_{kWh} – koszt 1 kWh energii w taryfie dla przedsiębiorców,

$k_{dystrybucji}$ – współczynnik kosztów dystrybucji.

- Abonament za użytkowanie aplikacji nadzorującej

$$k_{godz_{IS-APLIKACJA}} = \frac{K_{IS-A} + K_{IS-A/D} * I_D}{T}, \quad (5.27)$$

gdzie:

k_{IS-A} – koszt stałego abonamentu miesięcznego,

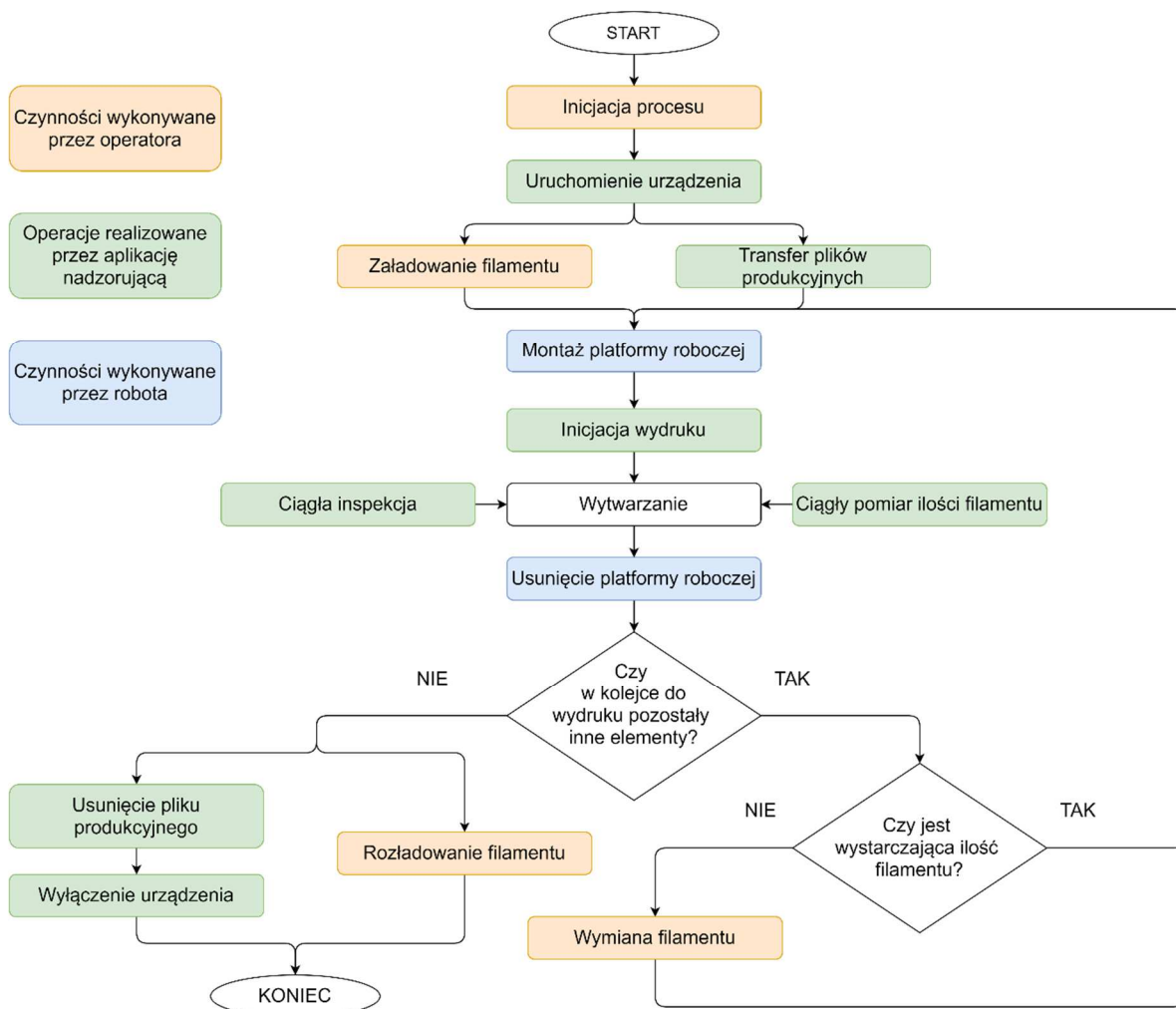
$k_{IS-A/D}$ – dodatkowy koszt abonamentu miesięcznego zależnego od liczby drukarek 3D,

I_D – liczba drukarek 3D,

T – założone miesięczne wykorzystanie parku maszynowego [godz].

5.1.3. Opis przebiegu procesu w trybie z drugim stopniem automatyzacji

Praca w tym trybie stanowi rozszerzenie wcześniej przedstawionego trybu wytwarzania w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji poprzez zastosowanie układu robotyzacji. Dodatkowym elementem środowiska wytwórczego jest robot współpracujący, którego zadaniem jest obsługa platform roboczych. Zastosowanie robota typu współpracującego umożliwia jednocześnie równoległą kooperację operatora zapewniając zarazem wysoki poziom bezpieczeństwa [123], [124]. Do szczególnych zadań robota należy transport pustych i zadrukowanych platform oraz ich instalacja i usuwanie ze stołu roboczego drukarki 3D. Wywoływanie odpowiednich programów zawierających zapisane wcześniej sekwencje ruchu odbywa się automatycznie z poziomu aplikacji nadzorującej proces wytwarzania z wykorzystaniem odpowiednich protokołów komunikacyjnych [125]. Rola operatora sprowadza się natomiast do konfiguracji procesu oraz późniejszej obsługi szpul filamentu poprzez ich załadunek i rozładunek (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Schemat przebiegu procesu w środowisku o drugim stopniu automatyzacji

- Czas pracy operatora:

$$T_{OP-AUTO 2} = T_{GPP} + T_{WSF} + T_{OA} + T_{PPS}, \quad (5.28)$$

gdzie:

T_{GPP} – czas generacji plików produkcyjnych,

T_{WPR} – czas wymiany platform roboczych,

T_{WSF} – czas wymiany szpul filamentu,

T_{OA} – czas obsługi aplikacji,

T_{PPS} – czas przejść i powrotów ze stanowiska.

- Czas generacji plików produkcyjnych – łączny czas potrzebny na wygenerowanie plików produkcyjnych wykorzystywanych w procesie wytwarzania z wykorzystaniem oprogramowania krojącego.

$$T_{GPP} = I_{PP} * t_{GPP}, \quad (5.29)$$

gdzie:

I_{PP} – liczba różnych plików produkcyjnych zastosowanych w procesie,

t_{GPP} – czas wygenerowania pojedynczego pliku produkcyjnego.

- Czas wymiany szpul filamentu – łączny czas wymiany szpul filamentu, uwzględnia początkowe uzbrojenie drukarki w nową szpulę oraz końcowe rozładowanie.

$$T_{WSF} = I_{SF} * t_{WSF}, \quad (5.30)$$

gdzie:

I_{SF} – liczba wykorzystanych szpul filamentu,

t_{WSF} – czas wykonania pojedynczej wymiany wymiany szpuli filamentu.

- Czas obsługi aplikacji – czas łączny interakcji operatora z aplikacją. Uwzględniony został czas potrzebny na konfigurację systemu do pracy oraz potwierdzenia przy wymianie filamentu.

$$T_{OA} = I_{SF} * t_{OA} + t_{KS}, \quad (5.31)$$

gdzie:

t_{KS} – czas konfiguracji systemu z poziomu interfejsu aplikacji.

- Czas przejść i powrotów ze stanowiska – łączny czas potrzebny na przejście i powrót ze stanowiska wytwarzania. Uwzględnione zostały przejścia w celu: uzbrojenia maszyn przed rozpoczęciem procesu oraz wymian szpul filamentu lub rozbrojenia maszyn po zakończeniu procesu.

$$T_{PPS} = (1 + I_{SF-MAX}) * t_{PPS}, \quad (5.32)$$

gdzie:

I_{SF-MAX} – największa liczba szpul filamentu wykorzystanych na drukarce 3D,

t_{PPS} – czas przejścia i powrotu ze stanowiska wytwarzania.

Czasy wykonywania poszczególnych operacji (tab. 5.3) wyznaczone zostały na podstawie pomiarów dokonanych w warunkach rzeczywistych przy wykorzystaniu opracowanego stanowiska badawczego.

Tab. 5.3. Czas trwania poszczególnych czynności operatora w trybie pracy zrobotyzowanej

Lp.	Czynność	Czas [mm:sss]	Oznaczenie
1	Wygenerowania pojedynczego pliku produkcyjnego	1:23	t_{GPP}
2	Obsługa aplikacji	0:11	t_{OPP}
4	Wymiana szpuli filamentu	1:37	t_{WSF}
5	Przejście i powrót do stanowiska	5:00	t_{PPS}

W celu oszacowania godzinnego kosztu pracy parku maszynowego opracowano zależności 5.33 – 5.39. Koszt ten został rozszerzony w stosunku do trybu wytwarzania w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji o pozycję związaną z utrzymaniem robota współpracującego.

- Godzinny koszt pracy parku maszynowego:

$$K_{godz_{PM-AUTO 2}} = K_{godz_D} + K_{godz_{IS}} + K_{godz_{UR}}, \quad (5.33)$$

gdzie:

K_{godz_D} – godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D liczony analogicznie jak w konwencjonalnym trybie pracy,

$K_{godz_{IS}}$ – godzinny koszt pracy infrastruktury sieciowej liczony analogicznie jak w trybie wytwarzania w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji,

$K_{godz_{UR}}$ – godzinny koszt pracy układu robotyzacji.

- Godzinny koszt pracy układu robotyzacji:

$$K_{godz_D} = k_{godz_{UR-AMORTYZACJA}} + k_{godz_{UR-ENERGIA}} + k_{godz_{UR-SERWIS}}, \quad (5.34)$$

gdzie:

$k_{godz_{UR-AMORTYZACJA}}$ – koszt amortyzacji zakupu układu robotyzacji w założonym czasie w przeliczeniu na godzinę pracy,

$k_{godz_{UR-ENERGIA}}$ – koszt zużycia energii elektrycznej w przeliczeniu na godzinę pracy,

$kgodz_{UR-SERWIS}$ – koszt obsługi serwisowej.

- Koszt amortyzacji układu robotyzacji:

$$kgodz_{UR-AMORTYZACJA} = \frac{k_{UR}}{t_{amortyzacji}}, \quad (5.35)$$

gdzie:

k_{UR} – koszt zakupu układu robotyzacji,

$t_{amortyzacji}$ – założony czas zwrotu kosztów zakupu układu robotyzacji.

- Koszt zakupu układu robotyzacji.

$$k_{UR} = k_{UR-ROBOT} + k_{UR-TOR_JEZDNY} + k_{UR-WINDA} + k_{UR-CHWYTAK} + k_{UR-WDROZENIE}, \quad (5.36)$$

gdzie:

$k_{IS-ROBOT}$ – koszt zakupu przełącznika sieciowego,

k_{UR-TOR_JEZDNY} – koszt zakupu toru jezdny,

$k_{UR-WINDA}$ – koszt zakupu windy do poruszania się w pionie,

$k_{UR-CHWYTAK}$ – koszt zakupu specjalistycznego chwytaka dla robota,

$k_{UR-WDROZENIE}$ – koszt wdrożenia układu robotyzacji.

- Koszt zużycia energii przez infrastrukturę sieciową:

$$kgodz_{IS-ENERGIA} = \frac{P_{UR-CZUWANIE} + P_{UR-PRACA} * i_C * \frac{t_C}{3600}}{1000} * k_{1kWh} * k_{dystrybucji}, \quad (5.37)$$

gdzie:

$P_{UR-CZUWANIE}$ – średnia moc pobierana przez układ robotyzacji w stanie beczynności [W],

$P_{UR-PRACA}$ – średnia moc pobierana przez układ robotyzacji w stanie pracy [W],

i_C – liczba cykli pracy w ciągu godziny [1/godz],

t_C – czas cyklu pracy [s],

k_{1kWh} – koszt 1 kWh energii w taryfie dla przedsiębiorców,

$k_{dystrybucji}$ – współczynnik kosztów dystrybucji.

- Liczba cykli pracy w ciągu godziny:

$$i_C = \frac{I_D}{T_W}, \quad (5.38)$$

gdzie:

I_D – liczba drukarek 3D,

T_W – czas pojedynczego wydruku.

- Koszt obsługi serwisowej układu robotyzacji:

$$k_{\text{godzUR-SERWIS}} = \frac{t_{\text{przeгляд-1M}} * k_{\text{op}}}{720 \text{ godz}} + \frac{t_{\text{przeгляд-6M}} * k_{\text{op}}}{4320 \text{ godz}} + \frac{t_{\text{przeгляд-12M}} * k_{\text{op}}}{8640 \text{ godz}}, \quad (5.39)$$

gdzie:

$t_{\text{przeгляд-1M}}$ – czas wykonania przeglądu miesięcznego,

$t_{\text{przeгляд-6M}}$ – czas wykonania przeglądu półrocznego,

$t_{\text{przeгляд-12M}}$ – czas wykonania przeglądu rocznego,

k_{op} – koszt godziny pracy operatora [zł/godz].

5.2. Przedstawienie obiektów wykorzystanych do badań

Jako dane wejściowe do badań symulacyjnych wykorzystano parametry trzech różnych modeli 3D – dwóch kół zębatach i korpusu przekładni. Modele różnią ilością wymaganego filamentu oraz czasem potrzebnym na ich wytworzenie. Do ich wytwarzania zastosowano dwa rodzaje materiału produkcyjnego – dostępne na rynku od rzeczywistych producentów.

5.2.1. Koło zębata KZ-1

Pierwszym obiektem wykorzystanym do opracowania planów procesów wytwarzania jest koło zębata o 95 zębatach prostych o średnicy podziałowej 120 mm. Gabaryty koła pozwalają na wydruk jednej sztuki na platformie roboczej. Ilość materiału potrzebnego do wytworzenia jednego egzemplarza koła wynosi 79 g, a czas wydruku to 6:56:00. Materiał zastosowany do wykonania koła to ABS (AcrylonitrileButadieneStyrene). Jest to jedno z najbardziej popularnych tworzyw sztucznych stosowanych w druku 3D. Materiał charakteryzuje się wysoką wytrzymałością, dużą twardością oraz odpornością na pęknięcia. Posiada również dużą odporność zmęczeniową przy pracy cyklicznej [126].

Producentem zastosowanego materiału produkcyjnego jest Nebula. W ofercie producenta znajdują się szpule materiału o wagach 0,5, 1,0 oraz 2,5 kg, których ceny rynkowe wynoszą odpowiednio 45,37, 75,61 i 185,99 zł netto.



Rys. 5.4. Model badawczy – koło zębate KZ-1

Praca w systemie manualnym zakłada wykonanie dwóch inspekcji przebiegu wydruku w jego trakcie przez operatora. Pierwsza inspekcja odbywa się po wytłoczeniu pierwszej warstwy modelu, natomiast druga po zakończeniu drukowania podpór.

Badaniom poddany został proces wytwarzania w przedstawionych wcześniej trzech modelach pracy (manualnej, sieciowej i zrobotyzowanej) w następujących konfiguracjach:

- produkcja 20 sztuk w systemach: 2 i 6 drukarek 3D,
- produkcja 100 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 drukarek 3D,
- produkcja 200 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 drukarek 3D,
- produkcja 500 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 i 30 drukarek 3D,
- produkcja 1000 sztuk w systemach: 2, 6, 12 i 30 drukarek 3D.

5.2.2. Korpus przekładni

Drugim obiektem wykorzystanym do przeprowadzenia symulacji jest korpus przekładni. Ze względu na jego gabaryt zdecydowano się na umieszczenie jednego modelu na platformie roboczej w procesie wytwarzania. Ilość materiału wymaganego do wytworzenia jednej sztuki korpusu przekładni wynosi 171 g. Czas wydruku wynosi 14 godzin i 50 minut.

Do produkcji zastosowano filament ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate). Materiał ten cechuje się dobrą odpornością na promieniowanie UV, warunki atmosferyczne oraz działanie wielu substancji chemicznych [127]. Właściwości te sprawiają, że jest często wykorzystywany do produkcji elementów dedykowanych do pracy w warunkach przemysłowych.



Rys. 5.5. Model badawczy – korpus przekładni

W procesie wytwarzania zastosowany został materiał pochodzący od firmy F3D Filament. Producent udostępnia szpule materiału w rozmiarach 0,2, 0,5, 1,0, 2,5 kg. Których ceny rynkowe wynoszą odpowiednio 22,76, 56,91, 104,88 i 234,96 zł netto.

Praca w systemie manualnym zakłada wykonanie dwóch inspekcji przebiegu wydruku w jego trakcie przez operatora. Pierwsza inspekcja odbywa się po wytłoczeniu pierwszej warstwy modelu, natomiast druga po zakończeniu drukowania podpór.

Badaniom poddany został proces wytwarzania w przedstawionych wcześniej trzech modelach pracy (manualnej, sieciowej i zrobotyzowanej) w następujących konfiguracjach:

- produkcja 20 sztuk w systemach: 2 i 6 drukarek 3D,
- produkcja 100 sztuk w systemach: 2, 6 i 30 drukarek 3D,
- produkcja 200 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 drukarek 3D,
- produkcja 500 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 drukarek 3D,
- produkcja 1000 sztuk w systemach: 2, 6, 12 i 30 drukarek 3D.

5.2.3. Koło zębate KZ-2

Trzecim obiektem badawczym jest koło zębate o 25 zębach i średnicy podziałowej 30 mm. Na jednej platformie roboczej możliwe jest umieszczenie jednocześnie do 20 modeli koła. Czas wydruku pojedynczego modelu wynosi 1 godzinę i 18 minut. W celu wytworzenia jednej sztuki wymagany jest materiał w ilości 11,5 g.



Rys. 5.6. Model badawczy – koło zębate KZ-2 (konfiguracja 20 szt. na platformie roboczej)

Filament wykorzystany w procesie wytwarzania to ABS, którego dostawcą jest Nebula. W ofercie producenta znajdują się szpule materiału o wagach 0,5, 1,0 oraz 2,5 kg, których ceny rynkowe wynoszą odpowiednio 45,37, 75,61 i 185,99 zł netto.

Praca w systemie manualnym zakłada wykonanie dwóch inspekcji przebiegu wydruku w jego trakcie przez operatora. Pierwsza inspekcja odbywa się po wytłoczeniu pierwszej warstwy modelu, natomiast druga po zakończeniu drukowania podpór.

Badaniom poddany został proces wytwarzania w przedstawionych wcześniej trzech modelach pracy (manualnej, sieciowej i zrobotyzowanej) w następujących konfiguracjach:

- produkcja 20 sztuk w systemie 2 drukarek 3D,
- produkcja 100 sztuk w systemach: 2 i 6 drukarek 3D,
- produkcja 200 sztuk w systemach: 2 i 6 drukarek 3D,
- produkcja 500 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 drukarek 3D,
- produkcja 1000 sztuk w systemach: 2, 6 i 12 drukarek 3D.

5.3. Analiza kosztów pracy parku maszynowego

5.3.1. Wytwarzanie w trybie konwencjonalnym

Godzinny koszt pracy parku maszynowego w konwencjonalnym trybie wytwarzania zależy od wielu czynników. Podzielić je można na trzy grupy związane z amortyzacją sprzętu, zużyciem energii oraz obsługą serwisową. Przedstawiona poniżej analiza bazuje na sprzęcie wykorzystanym do budowy stanowiska badawczego, gdzie zastosowane zostały drukarki 3D Prusa i3 MK3.

Cena netto drukarki 3D wynosi 3813 zł. Producent udziela gwarancji na urządzenie na okres 12 miesięcy. Zakładając zwrot kosztów zakupu sprzętu w okresie gwarancji, średni czas pracy 8 godzin dziennie oraz 250 dni pracujących w ciągu roku, czas amortyzacji wyniesie 2000 godzin roboczych. Korzystając z zależności 5.13 koszt amortyzacji jednej drukarki 3D wynosi:

$$kgodz_{D-AMORTYZACJA} = \frac{3813 \text{ zł}}{250 * 8 \text{ godz}} \approx 1,91 \text{ zł/godz}$$

Średnia moc pobierana przez drukarkę podczas wydruku wynosi 90 W. Jako koszt 1kWh przyjęto 0,785 zł na podstawie maksymalnej ceny gwarantowanej 1 MWh w 2023 roku w taryfie dla przedsiębiorców. Uwzględnione zostały przy tym koszty dystrybucji energii poprzez zastosowanie współczynnika na poziomie 1,5. Na podstawie 5.14 godzinny koszt zużycia energii wyniesie:

$$kgodz_{D-ENERGIA} = \frac{90W}{1000} * 0,785 \frac{\text{zł}}{\text{kWh}} * 1,5 \approx 0,11 \text{ zł/godz}$$

Powszechnie zalecane jest wykonanie przeglądu urządzenia w interwale 150 godzin roboczych podczas którego należy oczyścić i nasmarować prowadnice, wyczyścić dyszę ekstrudera oraz dokonać kalibracji. Koszt materiałów stosowanych do przeglądu oszacowany został na poziomie 5 zł (preparat do czyszczenia i smar do prowadnic). Czas potrzebny do wykonania czynności to pół godziny. Ponadto zalecane jest wykonanie serwisu polegającego na wymianie kompletu łożysk, pasków, dyszy, grzałki i wentylatora po 800 godzinach pracy. Zestaw części zamiennych producent oferuje w cenie 630 zł netto. Czas potrzebny do wykonania serwisu wynosi około 4 godzin roboczych. Prace te może wykonać przeszkolony pracownik, koszt jego pracy przyjęty został jako 60 zł/godz. Koszt obsługi serwisowej w przeliczeniu na godzinę pracy urządzenia wynosi:

$$kgodz_{D-SERWIS} = \frac{4 \text{ godz} * 60\text{zł/godz} + 630\text{zł}}{800 \text{ godz}} + \frac{0,5 \text{ godz} * 60\text{zł/godz} + 5\text{zł}}{150 \text{ godz}}$$

$$\approx 1,32 \text{ zł/godz}$$

Łączny koszt pracy zespołu drukarek 3D w zależności od liczby ich wykorzystania podsumowany został w tab. 5.4.

Tab. 5.4. Godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D – wytwarzanie w trybie konwencjonalnym

Liczba drukarek 3D	2	6	12	30
Koszt [zł/godz]	6,67	20,00	40,00	100,00

5.3.2. Wytwarzanie w trybie z pierwszym stopniem automatyzacji

Godzinny koszt pracy zespołu drukarek liczony jest analogicznie jak w przypadku wytwarzania w trybie konwencjonalnym. Z uwagi jednak na możliwość zdalnej kontroli urządzeń oraz zastosowanie mechanizmów automatycznej detekcji defektów wydruku możliwe jest wydłużenie efektywnego czasu pracy urządzeń w cyklu dobowym. Do celów analizy kosztów pracy przyjęta została możliwość pracy drukarek 3D przez 16 godzin w ciągu doby przez okres 250 dni w ciągu roku. Pozwala to na obniżenie kosztu godziny pracy drukarki ze względu na koszt jej amortyzacji w rocznym okresie gwarancji. Zgodnie z zależnością 5.13 koszt amortyzacji wynosi:

$$k_{godz_{D-AMORTYZACJA}} = \frac{3813 \text{ zł}}{250 * 16 \text{ godz}} \approx 0,95 \text{ zł /godz}$$

Pozostałe koszty związane z drukarkami 3D są tożsame z kosztami wytwarzania w trybie konwencjonalnym. Łączne koszty pracy zespołu drukarek w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji przedstawione zostały w tab. 5.5.

Tab. 5.5. Godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D – pierwszy stopień automatyzacji

Liczba drukarek 3D	2	6	12	30
Koszt [zł/godz]	4,76	14,28	28,56	71,40

Do kosztów pracy parku maszynowego należy uwzględnić te związane z utrzymaniem infrastruktury sieciowej. Można je pogrupować ze względu na amortyzację sprzętu, zużycie energii, koszt obsługi serwisowej oraz koszt utrzymania aplikacji nadzoru sieciowego.

Koszt zakupu infrastruktury sieciowej uzależniony jest od ilości drukarek 3D, które będą tworzyć wspólną strukturę sieciową. Do kosztów stałych zaliczyć można koszt zakupu przełącznika sieciowego, laptopa i serwera aplikacji. Koszty zależne od liczby drukarek 3D to koszty serwerów wydruku, kamer monitorujących proces, uchwytów z wagą szpuli oraz przekładników zasilania. Zestawienie poszczególnych kosztów przedstawione zostało w tab. 5.6.

Tab. 5.6. Przedstawienie kosztów elementów infrastruktury sieciowej

Lp.	Nazwa	Wartość netto [zł]	Uwagi
1	Przełącznik sieciowy z WiFi	2600	Na podstawie średnich cen rynkowych przełączników w klasie przemysłowej
2	Laptop	2400	Na podstawie średnich cen rynkowych

3	Serwer aplikacji	235	Komputer jednopłytkowy Raspberry PI
4	Serwer wydruku	235	Komputer jednopłytkowy Raspberry PI
5	Kamera	129	Na podstawie wybranego modelu kamery USB
6	Uchwyt	99	Oszacowanie własne
7	Przełącznik zasilania	19	Na podstawie średnich cen rynkowych

Na wymienione urządzenia producenci najczęściej udzielają gwarancji na okres 2 lat. Zakładając zwrot kosztów zakupu sprzętu w okresie gwarancji, średni czas pracy 16 godzin dziennie oraz 250 dni pracujących w ciągu roku, czas amortyzacji wyniesie 8000 godzin roboczych. Koszt amortyzacji infrastruktury sieciowej o strukturze z jedną drukarką 3D wyniesie zgodnie z zależnością 5.24:

$$kgodz_{IS-AMORTYZACJA} = \frac{2600 \text{ zł} + 2400 \text{ zł} + 235 \text{ zł} + 1 * (235 \text{ zł} + 129 \text{ zł} + 99 \text{ zł} + 19 \text{ zł})}{8000 \text{ godz}} \approx 1,15 \text{ zł/godz}$$

Zużycie energii elektrycznej infrastruktury sieciowej zależne jest od mocy poszczególnych urządzeń oraz liczby drukarek 3D. Zestawienie mocy urządzeń przedstawiono w tab. 5.7. Jako, że źródłem zasilania kamer, uchwytów z wagą i przełączników zasilania jest serwer wydruku danej drukarki 3D, ich moc została zsumowana i uwzględniona w pozycji „serwer wydruku”.

Tab. 5.7. Zestawienie mocy pobieranej przez poszczególne urządzenia infrastruktury sieciowej

Lp.	Nazwa	Moc [W]	Uwagi
1	Przełącznik sieciowy z WiFi	20	Na podstawie średnich mocy przełączników w klasie przemysłowej
2	Laptop	100	Na podstawie reprezentatywnego modelu laptopa
3	Serwer aplikacji	5	Komputer jednopłytkowy Raspberry PI
4	Serwer wydruku	10	Komputer jednopłytkowy Raspberry PI z wyposażeniem dodatkowym

Na podstawie przedstawionych wartości mocy urządzeń oraz założonej wcześniej ceny energii elektrycznej, koszt godzinowego zużycia energii elektrycznej infrastruktury sieciowej dla struktury z jedną drukarką 3D zgodnie z zależnością 5.26 wynosi:

$$kgodz_{IS-ENERGIA} = \frac{20W + 100W + 5W + 10W * 1}{1000} * 0,785 \frac{\text{zł}}{\text{kWh}} * 1,5 \approx 0,16 \text{ zł/godz}$$

Koszty obsługi serwisowej oszacowano na podstawie analizy ofert firm informatycznych oferujących usługi opieki serwisowej nad sprzętem komputerowym. Koszt serwisu urządzeń sieciowych określony został jako miesięczny abonament w wysokości

149 zł. W przełożeniu na godzinę pracy parku maszynowego, przy założeniu 21 dni pracujących w ciągu miesiąca i 16 godzin pracy dziennie, wynosi:

$$kgodz_{IS-SERWIS} = \frac{149 \text{ zł}}{336 \text{ godzin}} \approx 0,44 \text{ zł/godz}$$

Koszt abonamentu za użytkowanie aplikacji nadzoru sieciowego oszacowany został na podstawie analizy kosztów użytkowania aplikacji / platform chmurowych o podobnych funkcjonalnościach (Obico, Astroprint, SimplyPrint). Koszt miesięcznego abonamentu wyznaczony został jako suma składnika stałego 40 zł i opłaty zmiennej zależnej od ilości drukarek 3D w wysokości 12 zł / drukarka 3D. Koszt abonamentu w przeliczeniu na godzinę parku maszynowego w przypadku dla jednej drukarki 3D wynosi:

$$kgodz_{IS-APLIKACJA} = \frac{40 \text{ zł} + 12 \text{ zł} * 1}{336 \text{ godz}} \approx 0,15 \text{ zł/godz}$$

Wyniki obliczeń dla struktur o innych liczbach drukarek 3D przedstawiono w tab. 5.8.

Tab. 5.8. Godzinny koszt pracy infrastruktury sieciowej

Składnik	Liczba drukarek 3D			
	2	6	12	30
	Koszt [zł]			
Amortyzacja	0,77	1,02	1,38	2,46
Zużycie energii	0,17	0,22	0,29	0,50
Serwis	0,44	0,44	0,44	0,44
Aplikacja	0,19	0,33	0,55	1,19
Łącznie	1,58	2,01	2,66	4,60

Łączny koszt pracy parku maszynowego w zależności od ilości drukarek 3D przedstawiony został w tab. 5.9.

Tab. 5.9. Godzinny koszt pracy parku maszynowego w trybie pracy sieciowej

Liczba drukarek 3D	2	6	12	30
Koszt [zł/godz]	6,34	16,29	31,22	76,00

5.3.3. Wytwarzanie w trybie z drugim stopniem automatyzacji

Godzinny koszt pracy zespołu drukarek obliczony został analogicznie jak w przypadku wytwarzania w trybie konwencjonalnym i automatyzacji pierwszego stopnia. Z uwagi jednak na możliwość zdalnej kontroli urządzeń oraz zastosowanie robota współpracującego do wymian platform roboczych, możliwe jest prowadzenie produkcji w trybie ciągłym.

Uwzględniając jednak czasy przestoju związane z planowanymi serwisami urządzeń lub losowymi awariami do celów analizy kosztów pracy parku maszynowego przyjęto możliwość pracy drukarek 3D przez 24 godziny na dobę 365 dni w roku przy wydajności na poziomie 80%. Pozwala to na obniżenie kosztu godziny pracy drukarki ze względu na jej amortyzację w rocznym okresie gwarancji.

$$k_{godzD-AMORTYZACJA} = \frac{3813 \text{ zł}}{365 * 24 \text{ godz} * 0,8} \approx 0,54 \text{ zł /godz}$$

Pozostałe koszty związane z drukarkami 3D są tożsame z kosztami wytwarzania w trybie konwencjonalnym i automatyzacji pierwszego stopnia. Łączne koszty pracy zespołu drukarek w trybie pracy „autonomicznym” przedstawione zostały w tab. 5.10.

Tab. 5.10. Godzinny koszt pracy zespołu drukarek 3D – drugi stopień automatyzacji

Liczba drukarek 3D	2	6	12	30
Koszt [zł/godz]	3,94	11,83	23,65	59,13

Zwiększenie dobowego wykorzystania maszyn pozwala również na szybszą amortyzację infrastruktury sieciowej, oraz zmniejszenie godzinowego kosztu ze względu na obsługę serwisową oraz abonament aplikacji nadzoru sieciowego. Koszty te przedstawiono w tab. 5.11.

Tab. 5.11. Godzinny koszt pracy infrastruktury sieciowej – drugi stopień automatyzacji

Składnik	Liczba drukarek 3D			
	2	6	12	30
	Koszt [zł]			
Amortyzacja	0,44	0,58	0,79	1,41
Zużycie energii	0,17	0,22	0,29	0,50
Serwis	0,26	0,26	0,26	0,26
Aplikacja	0,11	0,19	0,32	0,69
Łącznie	0,98	1,25	1,65	2,86

Dodatkowe koszty funkcjonowania parku maszynowego związane są z pracą robota i torem jezdnym wykorzystywanych do transportu i wymian platform roboczych. Koszty te podzielone zostały na trzy grupy związane z amortyzacją urządzeń, zużyciem energii oraz kosztem obsługi serwisowej.

Koszt amortyzacji urządzeń uwzględnia zakup robota współpracującego, toru jezdno i windy, chwytaka oraz prac wdrożeniowych. Do przeprowadzonych oszacowań

wykorzystano robota Universal Robots UR5e – zastosowanego w stanowisku badawczym oraz dedykowany osprzęt (tor jezdny i winda). Sam robot jest w stanie obsłużyć do 4 drukarek 3D – dwie kolumny po dwie drukarki 3D ustawione jedna nad drugą. Przy większej liczbie drukarek należy zastosować tor jezdny o długości 1 m na 4 kolejne drukarki 3D. Dedykowany tor jezdny posiada maksymalną długość 3 m. Aby robot był w stanie obsłużyć więcej niż 16 drukarek 3D, należy zastosować dodatkową windę, a drukarki ustawić w pionowe kolumny po 3 urządzenia w każdej. Szacowane koszty rozwiązań przedstawiono w tab. 5.12.

Tab. 5.12. Zestawienie kosztów elementów układu robotyzacji

Lp.	Nazwa	Wartość netto [tys. zł]	Uwagi
1	Robot współpracujący	95	Na podstawie średnich cen rynkowych przełączników w klasie przemysłowej
2	Chwytnak	2	Konstrukcja mechaniczna
3	Tor jezdny 1000 mm	47,7	SlideKit 2.0 1000 mm
4	Tor jezdny 2500 mm	79,8	SlideKit 2.0 2500 mm
5	Tor jezdny 3000 mm	83	SlideKit 2.0 3000 mm
6	Winda 900 mm	27	LiftKit 900 mm

Koszt wdrożenia układu rozpatrzony został w zależności od ilości drukarek 3D i stopnia skomplikowania. Dla układu do 4 drukarek bez toru jezdnego założono 1 dzień roboczy, dla układu z torem jezdnym do 16 drukarek 3D w strukturze – 2 dni robocze, natomiast dla układu z torem jezdnym i windą powyżej 16 drukarek 3D – 3 dni robocze. Dzienny koszt prac wdrożeniowych oszacowano na 2000 zł. Łączne koszty wdrożenia przedstawiono w tab. 5.13.

Tab. 5.13. Koszt wdrożenia układu robotyzacji

Składnik	Liczba drukarek 3D			
	2	6	12	30
	Koszt [tys. zł]			
Robot	95	95	95	95
Chwytnak	2	2	2	2
Tor jezdny	-	47,7	79,8	83
Winda	-	-	-	27
Wdrożenie	2	4	4	6
Łącznie	99	148,7	180,8	213

Z uwagi na względnie wysokie koszty zakupu oraz wysoki wskaźnik bezawaryjnej pracy robotów przemysłowych czas amortyzacji sprzętu oparto o wskaźnik MTBF (MeanTime BetweenFailures) wynoszący 28000 godzin. Przy założeniu pracy 24 godziny na dobę 365 dni w roku z wydajnością na poziomie 80%, układ robotyzacji powinien amortyzować się po 35000 godzinach pracy. Koszty z tym związane w przeliczeniu na godzinę pracy parku maszynowego przedstawione zostały w tab. 5.14

Tab. 5.14. Koszt amortyzacji układu robotyzacji

Liczba drukarek	2	6	12	30
Koszt [zł/godz]	2,26	3,40	4,13	4,87

Koszty związane ze zużyciem energii zależą od częstotliwości i długości cyklu pracy oraz pobieranej mocy w czasie ruchu i w trybie czuwania. Te drugie można potraktować jako sumę wartości odczytanych z not katalogowych poszczególnych podzespołów. Do celów analizy przyjęto 15 W w trybie czuwania oraz 870 W podczas pracy. Częstotliwość cyklu pracy zależy od długości trwania procesu wytwarzania oraz ilości drukarek 3D obsługiwanych przez robota. Długość cyklu pracy określona została w wyniku prób laboratoryjnych – 103 s. Zestawienie kosztów zużycia energii przez układ robotyzacji przedstawione zostało w tab. 5.15.

Tab. 5.15. Godzinny koszt zużycia energii przez układ robotyzacji

Wytwarzany model 3D	Czas wydruku [hh:mm]	Liczba drukarek 3D			
		2	6	12	30
		Koszt [zł/godz]			
Koło zębate KZ-1	06:56	0,017	0,034	0,059	0,135
Korpus przekładni	14:50	0,012	0,020	0,032	0,068
Koło zębate KZ-2 1szt.	1:18	0,053	0,144	0,279	0,685
Koło zębate KZ-2 20 szt.	26:00	0,010	0,015	0,022	0,042

Koszty związane z serwisem urządzeń ograniczają się do wykonywania przeglądów i bieżącej konserwacji sprzętu. Producenci wyszczególniają czynności wykonywane z interwałem miesięcznym, półrocznym i rocznym. Zakłada się ich wykonanie przez przeszkolonego operatora produkcji, którego godzinny koszt pracy wynosi 60 zł. Koszt obsługi serwisowej w przeliczeniu na godzinę pracy parku maszynowego wynosi:

$$k_{godz_{UR-SERWIS}} = \frac{1 \text{ godz} * 60 \text{ zł}}{720 \text{ godz} * 0,8} + \frac{1 \text{ godz} * 60 \text{ zł}}{4320 \text{ godz} * 0,8} + \frac{2 \text{ godz} * 60 \text{ zł}}{8640 \text{ godz} * 0,8} \approx 0,14 \text{ zł/godz}$$

Łączne zestawienie kosztu godziny pracy układu robotyzacji w zależności od procesu oraz liczby drukarek przedstawiono w tab. 5.16. Zaobserwować można wzrost kosztu wraz ze wzrostem liczby obsługiwanych drukarek oraz jego spadek wraz z wydłużeniem czasu pojedynczego wydruku. Ma to bezpośredni związek z częstotliwością cyklu pracy układu robotyzacji.

Tab. 5.16. Łączny godzinny koszt pracy układu robotyzacji.

Wytwarzany model 3D	Czas wydruku [hh:mm]	Liczba drukarek 3D			
		2	6	12	30
		Koszt [zł/godz]			
Koło zębate KZ-2 1szt.	1:18	3,02	4,53	5,58	6,91
Koło zębate KZ-1	06:56	2,98	4,42	5,53	6,63
Korpus przekładni	14:50	2,98	4,41	5,53	6,29
Koło zębate KZ-2 20 szt.	26:00	2,98	4,40	5,32	6,26

Całkowity godzinny koszt pracy parku maszynowego w środowisku wytwórczym z drugim stopniem automatyzacji przedstawiony został w tab. 5.17.

Tab. 5.17. Godzinny koszt pracy parku maszynowego – drugi stopień automatyzacji

Wytwarzany model 3D	Czas wydruku [hh:mm]	Liczba drukarek 3D			
		2	6	12	30
		Koszt [zł/godz]			
Koło zębate KZ-1	06:56	7,91	17,50	30,67	68,34
Korpus przekładni	14:50	7,90	17,48	30,64	68,28
Koło zębate KZ-2 1szt.	1:18	7,94	17,61	30,89	68,89
Koło zębate KZ-2 20 szt.	26:00	7,90	17,48	30,63	68,25

Przedstawione koszty pracy parku maszynowego, zależne od liczby drukarek i wytwarzanych modeli 3D, wykorzystane zostały w celu określenia wpływu automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego metodą MEX na finalny koszt wytwarzania.

5.4. Symulacja procesu wytwarzania

W celu zobrazowania przyjętej metodyki badań w dalszej części przedstawione zostały wybrane symulacje procesów wytwarzania. Stanowią one reprezentatywne przypadki pozwalające na wskazanie obszarów zastosowania poszczególnych stopni automatyzacji w procesie wytwarzania przyrostowego.

5.4.1. Koło zębate KZ-1, partia 500 sztuk, struktura 12 drukarek 3D

Proces produkcji zakłada wykorzystanie wszystkich dwunastu dostępnych drukarek 3D. Wszystkie urządzenia uzbrajane są początkowo w szpule materiałów o wadze 2,5kg. Ustawienie to pozwala na wytworzenie po 31 kół zębatach na każdej drukarce 3D (łącznie 372 wydruków). Po zużyciu filamentu dziesięć drukarek 3D uzbrajane jest w szpule o wadze 1 kg, natomiast dwie pozostałe w szpule o wadze 0,5 kg. Podczas drugiej serii wydruków wytworzonych zostaje 128 modeli 3D. W każdym przypadku wytwarzany jest jedynie jeden model koła zębatego na platformie roboczej. Przebieg procesu ujęty został w tab. 5.18.

Tab. 5.18. Plan procesu wytwarzania

Lp.	Numer wybranych drukarek 3D	Liczba drukarek 3D	Nazwa pliku produkcyjnego	Liczba wydruków / drukarka 3D	Liczba elementów / wydruk	Liczba wydruków łącznie	Liczba elementów łącznie	Numer szpuli dla wybranych drukarek 3D	Waga szpuli [kg]	Odpad materiału z jednej drukarki [g]	Odpad materiału łącznie [g]
1	1-12	12	KZ1_1	1	31	372	372	1	2,5	51	612
2	1-10	10	KZ1_1	1	12	120	120	2	1,0	52	520
3	11-12	2	KZ1_1	1	4	8	8	2	0,5	184	368

Wykaz koniecznego do zakupu materiału przedstawiony został w tab. 5.19. Sumaryczny koszt zakupu materiału produkcyjnego wynosi 3078,72 zł netto, co w przeliczeniu na jeden wytworzony model wynosi 6,16 zł. Łączny odpad materiału stanowi 2,5 %.

Tab. 5.19 Wykaz zastosowanych szpul filamentu

Waga szpuli [kg]	Liczba szpul	Cena jednostkowa [zł]	Cena łącznie [zł]	Waga materiału [kg]	Odpad
0,5	2	45,37	90,74	1,0	2x184g
1,0	10	75,61	756,10	10,0	10x52g

2,5	12	185,99	2231,88	30,0	12x51
Łącznie	24	-	3078,72	41,0	1500g (3,66%)
Koszt netto materiału w przeliczeniu na jeden element: 6,16 zł					

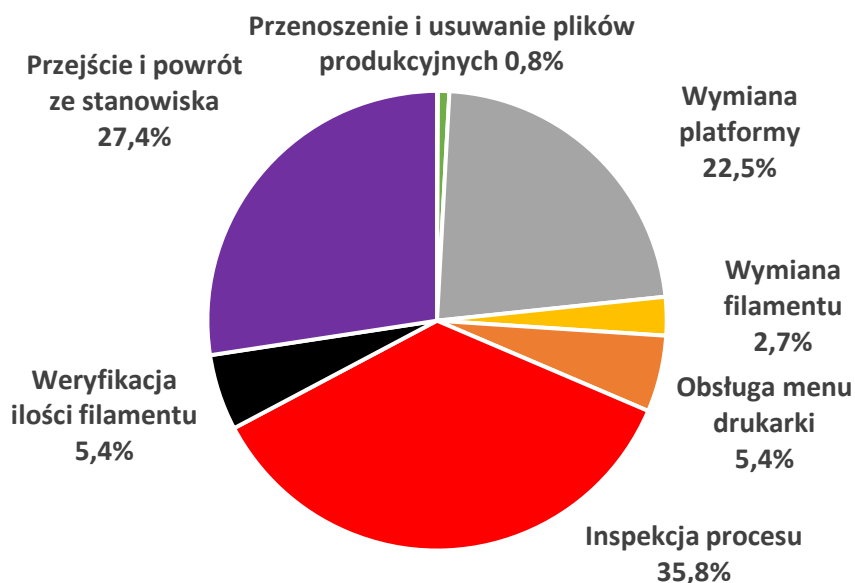
Ilość poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w konwencjonalnym trybie pracy przedstawia tab. 5.20. Sumaryczny czas pracy operatora w tym trybie wynosi:

$$T_{OP-KONWENCJONALNY} = 39 \text{ godz } 32 \text{ min } 59 \text{ sek}$$

Tab. 5.20. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb konwencjonalny

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	1	0:01:23
2	Przenoszenie i usuwanie plików produkcyjnych	24	0:18:48
3	Wymiana platformy	500	8:53:20
4	Wymiana filamentu	24	1:04:24
5	Obsługa menu drukarki	548	2:07:52
6	Inspekcja procesu	1000	14:10:00
7	Weryfikacja ilości filamentu	106	2:07:12
8	Przejsie i powrót ze stanowiska	130	10:50:00

Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.7. Zaobserwować można znaczny udział czasu związany z inspekcjami procesu, pokonaniem drogi przez operatora do stanowiska wytwórczego i z powrotem oraz wymianami platform.



Rys. 5.7. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb konwencjonalny

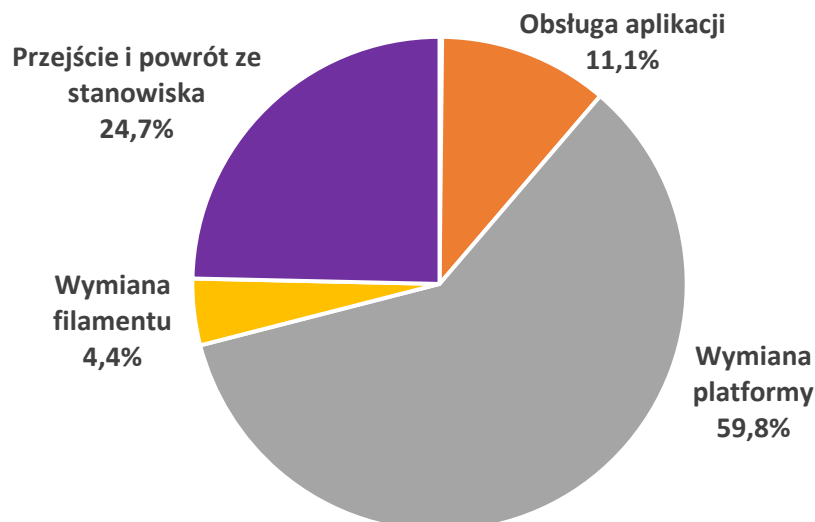
Liczbę poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w środowisku wytwórczym o pierwszym stopniu automatyzacji przedstawia tab. 5.21. W stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym zauważyć można znaczną redukcję liczby przejść i powrotów operatora ze stanowiska pracy (ze 134 do 44). Część pozycji pozostaje stała (przygotowanie plików produkcyjnych, wymiana platformy). Zaobserwowana została również niewielka redukcja czasu pracy związana z wymianą filamentu, gdyż dzięki zaimplementowanym mechanizmom automatyzacji ekstruder drukarki jest już rozgrzany w momencie podejścia operatora do stanowiska wytwarzania. Wymiana platformy w dalszym ciągu zajmuje tyle samo czasu. Pozycja „obsługa aplikacji” jest odpowiednikiem „obsługi menu drukarki 3D” w trybie konwencjonalnym, przy czym można zauważyć niewielką redukcję czasu trwania operacji w tym zakresie. Ponadto odpadły pozycje związane z obsługą plików produkcyjnych, inspekcją procesu oraz weryfikacją stanu filamentu – operacje te wykonywane są automatycznie poprzez aplikację nadzorującą proces wytwarzania. Sumaryczny czas pracy operatora w trybie pracy z pierwszym stopniem automatyzacji wynosi:

$$T_{OP-AUTO 1} = 14 \text{ godz } 51 \text{ min } 12 \text{ sek}$$

Tab. 5.21. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb automatyzacji pierwszego stopnia

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	1	0:01:23
2	Obsługa aplikacji	524	1:39:04
3	Wymiana platformy	500	8:53:20
4	Wymiana filamentu	24	0:38:48
5	Przejsie i powrót ze stanowiska	44	3:40:00

Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.8. Zaobserwować można znaczny udział czasu związany z wymianą platform roboczych.



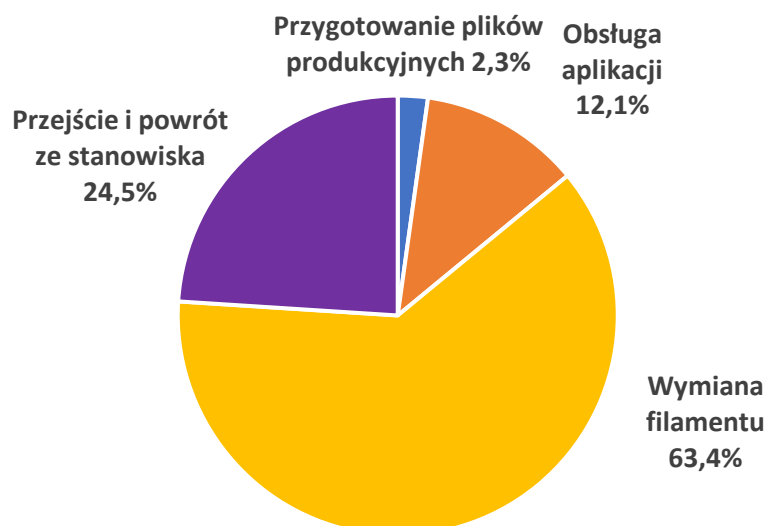
Rys. 5.8. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb automatyzacji I stopnia

Wykaz poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w środowisku wytórczym o drugim stopniu automatyzacji przedstawiony został w tab. 5.22. W stosunku do pracy w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji zauważyć można znaczną redukcję liczby przejść i powrotów operatora ze stanowiska pracy (z 44 do 3). Związane jest to z zastąpieniem pracy operatora przez robota współpracującego podczas wymiany platform roboczych w drukarkach 3D. Operator nie potrzebuje również potwierdzać wykonania tych czynności z poziomu aplikacji nadzorującej, przez co czas jej obsługi został zredukowany. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.9. Sumaryczny czas pracy operatora w trybie wytwarzania z drugim stopniem automatyzacji wynosi:

$$T_{OP-AUTO 2} = 1 \text{ godz } 1 \text{ min } 12 \text{ sek}$$

Tab. 5.22. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb automatyzacji drugiego stopnia

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	1	0:01:23
2	Obsługa aplikacji	24	0:07:24
3	Wymiana filamentu	24	0:38:48
4	Przejsie i powrót ze stanowiska	3	0:15:00



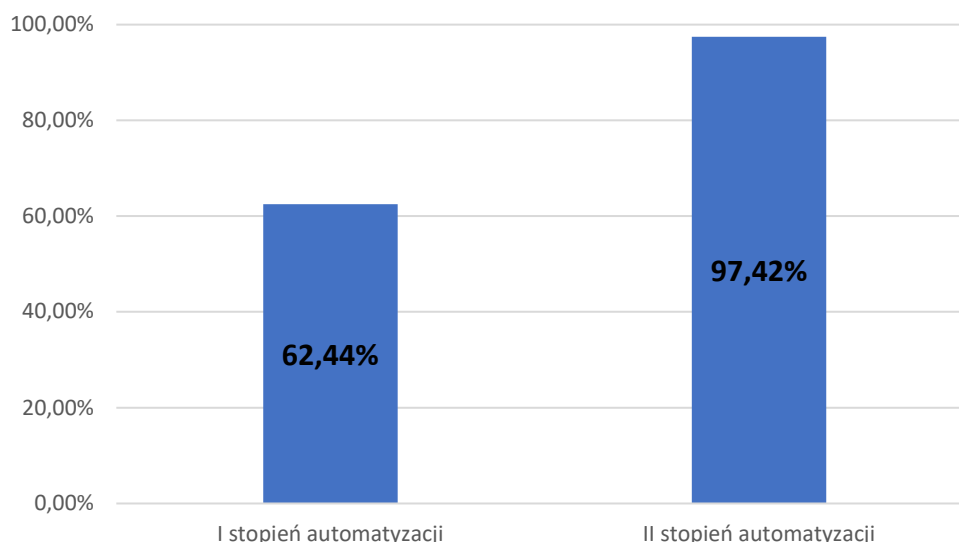
Rys. 5.9 Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb automatyzacji II stopnia

Zestawienie czasu pracy operatora w poszczególnych trybach wytwarzania oraz kosztów z tym związanych przedstawiono w tab. 5.23. Założono przy tym koszt godziny pracy operatora równy 60 zł.

Tab. 5.23. Wykaz czasu i kosztów pracy operatora

Model pracy	Czas pracy operatora	Koszt pracy operatora [zł]
Tradycyjny	39:32:59	2 372,98
Automatyzacja I stopnia	14:51:12	891,20
Automatyzacja II stopnia	1:01:12	61,20

Wykres na rys. 5.10 przedstawia stopień redukcji czasu pracy i kosztów pracy operatora w stosunku do konwencjonalnego trybu pracy. Zastosowanie automatyzacji powoduje redukcję tych wartości odpowiednio o 62,44 % (pierwszy stopień automatyzacji), i o 97,42 % (drugi stopień automatyzacji).



Rys. 5.10. Redukcja kosztów i czasu pracy operatora w stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym

Czas wykorzystania parku maszynowego określony został na podstawie łącznej liczby wykonanych wydruków, ilości zastosowanych drukarek 3D w procesie oraz czasu trwania pojedynczego wydruku z uwzględnieniem czynności przygotowania do kolejnego wydruku.

$$T_{PM} = \frac{500 * (6:56:00 + 0:02:00)}{12} \approx 290,28 \text{ godz}$$

Koszty związane z wykorzystaniem parku maszynowego w poszczególnych trybach pracy przedstawione zostały w tab. 5.24. Najwyższe koszty pracy parku maszynowego odnotowano podczas wytwarzania w trybie konwencjonalnym, natomiast najniższe w przypadku wytwarzania w środowisku o drugim stopniu automatyzacji.

Tab. 5.24. Koszty pracy parku maszynowego

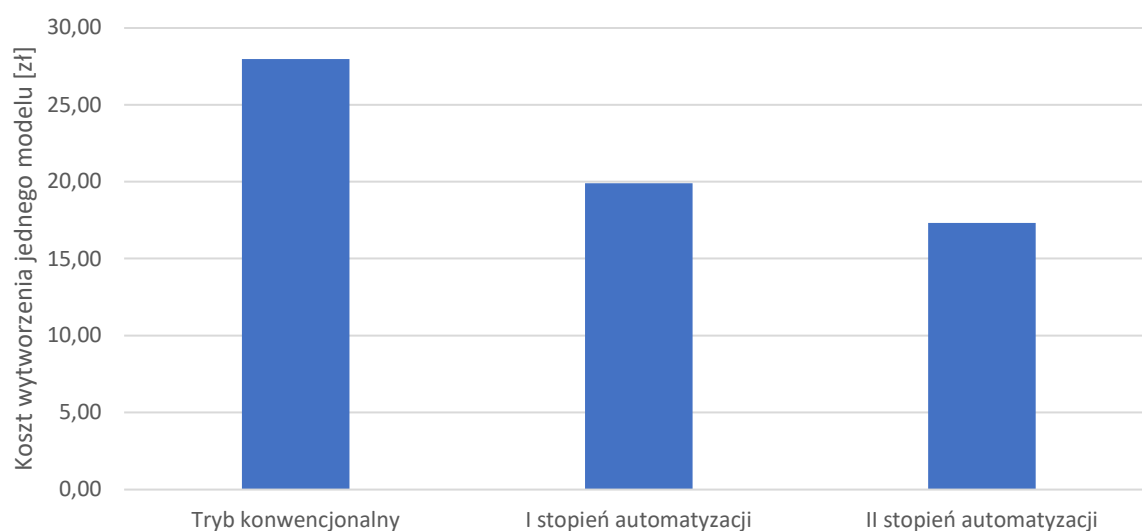
Model pracy	Godzinny koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	Koszt pracy parku maszynowego [zł]
Konwencjonalny	40,00	11 611,02
Automatyzacja I stopnia	31,22	9 061,79
Automatyzacja II stopnia	29,63	8 601,55

Łączne koszty wytworzenia przedstawione zostały w tab. 5.25. Są to koszty związane z pracą operatora i parku maszynowego na wysokość których ma wpływ implementacja mechanizmów automatyzacji. Nie zostały uwzględnione koszty materiału oraz prac wykończeniowych w ramach czynności post-processingu.

Tab. 5.25. Obliczone koszty wytworzenia

Model pracy	Koszt łącznie [zł]	Koszt jednego modelu [zł]
Konwencjonalny	13 984,01	27,97
Automatyzacja I stopnia	9 952,99	19,91
Automatyzacja II stopnia	8 662,75	17,33

Wykres na rys. 5.11 przedstawia porównanie kosztu wytworzenia jednego modelu w poszczególnych trybach pracy. Omówiony przypadek jest przykładem konfiguracji procesu i struktury wytwórczej, gdzie najwyższe koszty wytwarzania odnotowane zostały podczas pracy w trybie konwencjonalnym, natomiast najniższe w przypadku wytwarzania w środowisku o drugim stopniu automatyzacji.



Rys. 5.11. Porównanie kosztów wytworzenia w poszczególnych trybach pracy

5.4.2. Korpus przekładni, partia 500 sztuk, struktura 6 drukarek 3D

Proces produkcji zakłada wykorzystanie wszystkich sześciu dostępnych drukarek 3D. Wszystkie urządzenia uzbrajane są pięciokrotnie w szpule o wadze 2,5 kg. Ustawienie to pozwala na wytworzenie po 17 modeli korpusu przekładni na każdej drukarce 3D podczas pracy z pierwszymi czterema szpulami (łącznie 408 wydruków). W ostatniej serii dwie drukarki 3D wytwarzają po 16, natomiast cztery pozostałe po 15 sztuk modeli 3D. Plan procesu wytwarzania przedstawiony został w tab. 5.26.

Tab. 5.26. Plan procesu wytwarzania

Lp.	Numer wybranych drukarek 3D	Liczba drukarek 3D	Nazwa pliku produkcyjnego	Liczba wydruków / drukarka 3D	Liczba elementów / wydruk	Liczba wydruków łącznie	Liczba elementów łącznie	Numer szpuli dla wybranych drukarek 3D	Waga szpuli [kg]	Odpad materiału z jednej drukarki [g]	Odpad materiału łącznie [g]
1	1-6	6	KP_1	17	1	102	102	1	3,0	93	558
2	1-6	6	KP_1	17	1	102	102	2	3,0	93	558
3	1-6	6	KP_1	17	1	102	102	3	3,0	93	558
4	1-6	6	KP_1	17	1	102	102	4	3,0	93	558
5	1-2	2	KP_1	16	1	32	32	5	3,0	264	528
6	3-6	4	KP_1	15	1	60	60	5	3,0	435	1740

Wykaz koniecznego do zakupu materiału przedstawiony został w tab. 5.27. Sumaryczny koszt zakupu materiału produkcyjnego wynosi 7048,80 netto, co w przeliczeniu na jeden wytworzony model wynosi 14,10 zł. Łączny odpad materiału stanowi 5,0 %.

Tab. 5.27 Wykaz zastosowanych szpul filamentu

Waga szpuli [kg]	Liczba szpul	Cena jednostkowa [zł]	Koszt [zł]	Waga materiału [kg]	Odpad
3,0	30	234,96	7048,80	30,0	24x93g, 2x264g, 4x435g
Łącznie	30	-	7048,80	30,0	4500g (5,00%)
Koszt netto materiału w przeliczeniu na jeden element: 14,10 zł					

Liczbę i czas trwania poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w konwencjonalnym trybie pracy przedstawia tab. 5.28. Sumaryczny czas pracy operatora w tym trybie wynosi:

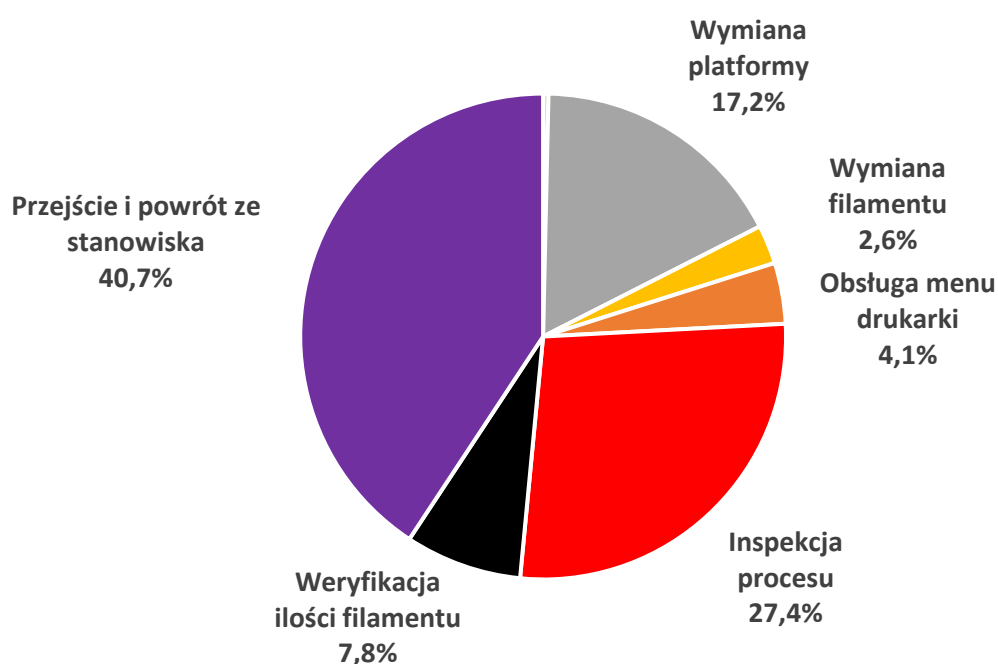
$$T_{OP-konwencjonalny} = 51 \text{ godz } 47 \text{ min } 17 \text{ sek}$$

Tab. 5.28. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb konwencjonalny

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	1	0:01:23
2	Przenoszenie i usuwanie plików produkcyjnych	12	0:09:24
3	Wymiana platformy	500	8:53:20

4	Wymiana filamentu	30	1:20:30
5	Obsługa menu drukarki	542	2:06:28
6	Inspekcja procesu	1000	14:10:00
7	Weryfikacja ilości filamentu	201	4:01:12
8	Przejście i powrót ze stanowiska	253	21:05:00

Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.12. Zaobserwować można znaczny udział czasu związany z przejściem i powrotem operatora ze stanowiska wytwarzania, inspekcjami procesu, jak również wymianą platform.



Rys. 5.12. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb tradycyjny

Liczbę poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w środowisku wytwórczym o pierwszym stopniu automatyzacji przedstawia tab. 5.29. W stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym zauważyć można znaczną redukcję liczby przejść i powrotów operatora ze stanowiska pracy (z 253 do 85). Część pozycji pozostaje stała (przygotowanie plików produkcyjnych, wymiana platformy). Zaobserwowana została również niewielka redukcja czasu pracy związana z wymianą filamentu, gdyż dzięki zaimplementowanym mechanizmom automatyzacji ekstruder drukarki jest już rozgrzany w momencie podejścia operatora do stanowiska wytwarzania. Wymiana platformy w dalszym ciągu zajmuje taką samą ilość czasu. Pozycja „obsługa aplikacji” jest odpowiednikiem „obsługi menu drukarki 3D” w trybie konwencjonalnym, przy czym można zauważyć niewielką redukcję czasu trwania operacji w tym zakresie. Ponadto odpadły pozycje związane z obsługą plików

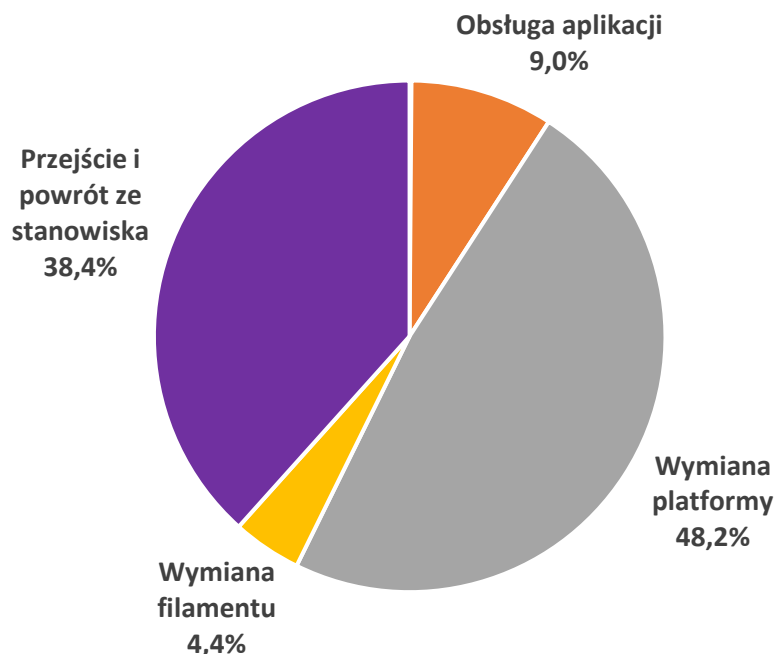
produkcyjnych, inspekcją procesu oraz weryfikacją stanu filamentu – operacje te wykonywane są automatycznie poprzez aplikację nadzorującą proces wytwarzania. Sumaryczny czas pracy operatora w trybie pracy z pierwszym stopniem automatyzacji wynosi:

$$T_{O-AUTO 1} = 18 \text{ godz } 27 \text{ min } 00 \text{ sek}$$

Tab. 5.29. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb automatyzacji pierwszego stopnia

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	1	0:01:23
2	Obsługa aplikacji	530	1:40:10
3	Wymiana platformy	500	8:53:20
4	Wymiana filamentu	30	0:48:30
5	Przejsie i powrót ze stanowiska	85	7:05:00

Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.13. Zaobserwować można znaczny udział czasu związany z wymianą platform roboczych oraz przejściem i powrotem operatora ze stanowiska wytwarzania.



Rys. 5.13. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb automatyzacji I stopnia

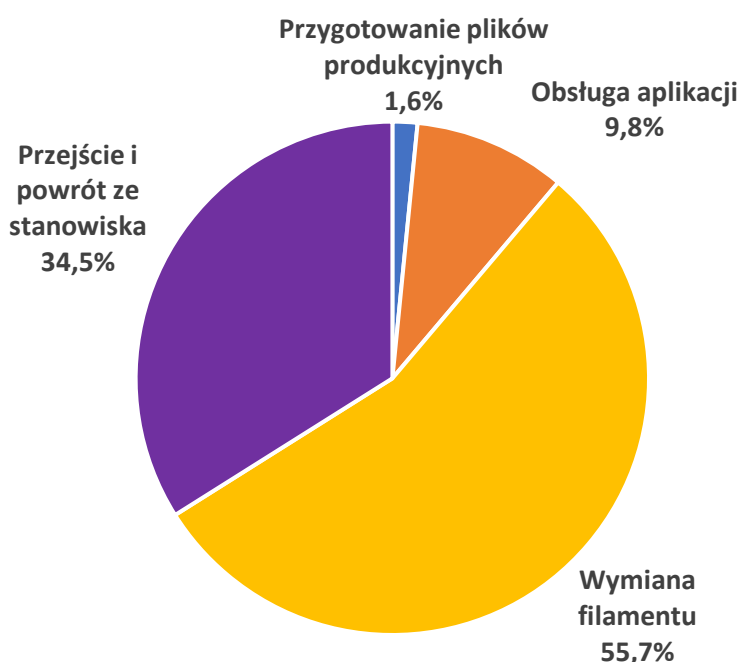
Wykaz operacji wykonywanych przez operatora w trybie pracy o drugim stopniu automatyzacji przedstawiony został w tab. 5.30. W stosunku do pracy w trybie o pierwszym

stopniu automatyzacji zauważyć można znaczną redukcję przejść i powrotów operatora ze stanowiska pracy (z 85 do 6). Związane jest to z zastąpieniem pracy operatora przez robota współpracującego podczas wymiany platform roboczych w drukarkach 3D. Operator nie potrzebuje również potwierdzać wykonania tych czynności z poziomu aplikacji nadzorującej, przez co czas jej obsługi został zredukowany. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.14. Sumaryczny czas pracy operatora w trybie wytwarzania z drugim stopniem automatyzacji wynosi:

$$T_{OP-AUTO 2} = 1 \text{ godz } 1 \text{ min } 12 \text{ sek}$$

Tab. 5.30. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb automatyzacji drugiego stopnia

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	1	0:01:23
2	Obsługa aplikacji	30	0:08:30
3	Wymiana filamentu	30	0:48:30
4	Przejście i powrót ze stanowiska	6	0:30:00



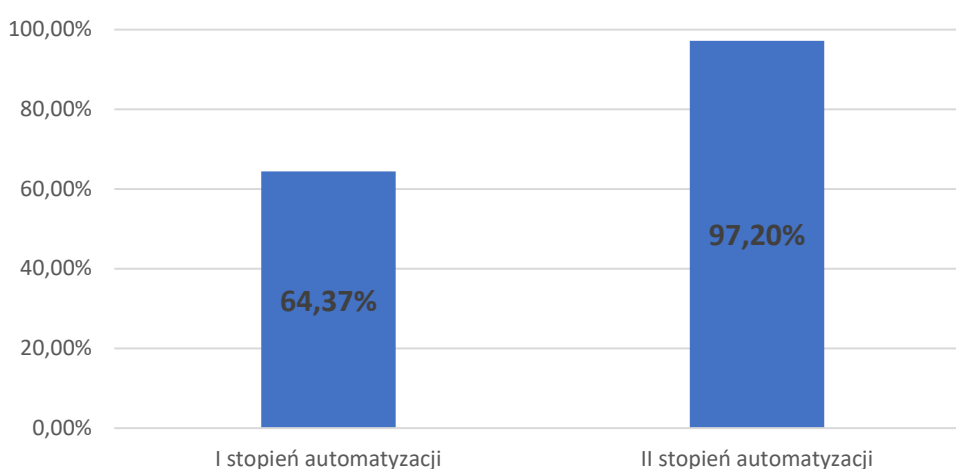
Rys. 5.14. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb automatyzacji II stopnia

Zestawienie czasu pracy operatora w poszczególnych trybach wytwarzania oraz kosztów z tym związanych przedstawiono w tab. 5.31. Założono przy tym koszt godziny pracy operatora równy 60 zł.

Tab. 5.31. Zestawienie czasu i kosztów pracy operatora

Model pracy	Czas pracy operatora	Koszt pracy operatora [zł]
Konwencjonalny	51:47:17	3 107,28
Automatyzacja I stopnia	18:27:00	1 107,00
Automatyzacja II stopnia	1:27:00	87,00

Wykres na rys. 5.15 przedstawia stopień redukcji czasu pracy i kosztów pracy operatora w stosunku do konwencjonalnego trybu pracy. Dzięki wprowadzonym mechanizmom automatyzacja wartości te zredukowane zostały o 64,37 % (pierwszy stopień automatyzacji) i o 97,20 % (drugi stopień automatyzacji).



Rys. 5.15. Redukcja kosztów i czasu pracy operatora w stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym

Czas wykorzystania parku maszynowego określony został na podstawie łącznej liczby wykonanych wydruków, ilości zastosowanych drukarek 3D w procesie oraz czasu trwania pojedynczego wydruku z uwzględnieniem czynności przygotowania do kolejnego wydruku.

$$T_{PM} = \frac{500 * (14:50:00 + 0:02:00)}{6} \approx 1238,88 \text{ godz}$$

Koszty związane z wykorzystaniem parku maszynowego w poszczególnych trybach pracy przedstawione zostały w tab. 5.32 Najwyższe koszty pracy parku maszynowego odnotowano dla konwencjonalnego, a najniższe dla trybu pracy w pierwszym stopniu automatyzacji.

Tab. 5.32. Koszty pracy parku maszynowego

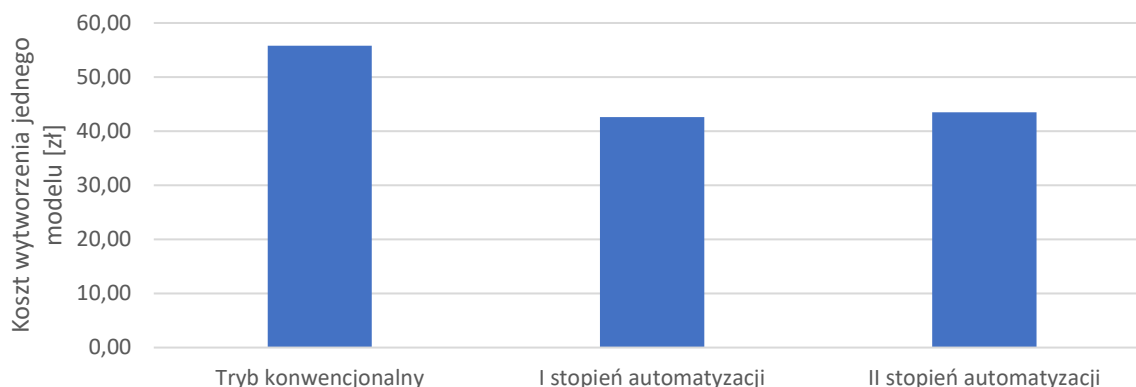
Model pracy	Godzinny koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	Koszt pracy parku maszynowego [zł]
Konwencjonalny	20,00	24 777,59
Automatyzacja I stopnia	16,29	20 182,55
Automatyzacja II stopnia	17,48	21 658,08

Łączne koszty wytworzenia przedstawione zostały w tab. 5.33. Są to koszty związane z pracą operatora i parku maszynowego. Nie zostały uwzględnione koszty materiału oraz prac wykończeniowych w ramach czynności post-processingu.

Tab. 5.33. Obliczone koszty wytworzenia

Model pracy	Koszt łącznie [zł]	Koszt jednego modelu [zł]
Konwencjonalny	13 984,01	55,77
Automatyzacja I stopnia	9 952,99	42,58
Automatyzacja II stopnia	8 662,75	43,49

Wykres na rys. 5.16 przedstawia porównanie kosztu wytworzenia jednego modelu w poszczególnych trybach pracy. Omówiony przypadek jest przykładem konfiguracji procesu i struktury wytwórczej, gdzie najniższe koszty wytwarzania odnotowane zostały podczas pracy w trybie wytwarzania z pierwszym stopniem automatyzacji, natomiast wprowadzenie drugiego stopnia automatyzacji nieznacznie zwiększyło koszt wytworzenia. W obu jednak przypadkach koszty zostały zredukowane w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym.



Rys. 5.16. Porównanie kosztów wytworzenia w poszczególnych trybach pracy

5.4.3. Koło zębate KZ-2, partia 500 sztuk, struktura 2 drukarek 3D

Wytwarzanie kół zębatach KZ-2 to przykład, gdzie zastosowana została konsolidacja wielu modeli 3D na jednej platformie roboczej podczas pojedynczego wydruku. Ma to na celu redukcję powtarzalnych czynności takich jak np. wymiana platformy roboczej. Pozwala również na jednoczesną kontrolę jakości poprocesowej (np. za pomocą skanera 3D) większej liczby elementów. W celu optymalnego wykorzystania materiału produkcyjnego na potrzeby omawianego procesu konieczne jest wygenerowanie trzech plików produkcyjnych zawierające odpowiednio 20, 17 i 3 modele 3D na platformie roboczej. Początkowo drukarki 3D uzbrajane są w szpule o wadze 2,5 kg. Na każdej z nich wykonywanych jest 10 wydruków po 20 elementów na platformie oraz jeden wydruk zawierający 17 modeli 3D. Następnie maszyny uzbrajane zostają w szpule o wadze 0,5 kg. Na pierwszej drukarce 3D wykonywane są 2 wydruki po 20 oraz 1 zawierający 3 modele 3D. Z wykorzystaniem drukarki nr 2 wykonywany jest natomiast jeden wydruk zawierający 20 i jeden zawierający 3 modele 3D. Przebieg procesu wytwarzania przedstawiony został w tab. 5.34.

Tab. 5.34. Plan procesu wytwarzania

Lp.	Numery wybranych drukarek 3D	Liczba drukarek 3D	Nazwa pliku produkcyjnego	Liczba wydruków / drukarka 3D	Liczba elementów / wydruk	Liczba wydruków łącznie	Liczba elementów łącznie	Numer szpuli dla wybranych drukarek 3D	Waga szpuli [kg]	Odpad materiału z jednej drukarki [g]	Odpad materiału łącznie [g]
1	1-2	2	KZ-2_20	10	20	20	400	1	2,5	4,5	9
			KZ-2_17	1	17	2	34				
2	1	1	KZ-2_20	2	20	2	40	2	0,5	5,5	5,5
			KZ-2_3	1	3	1	3				
3	2	1	KZ-2_20	1	20	1	20	2	0,5	235,5	235,5
			KZ-2_3	1	3	1	3				

Wykaz zastosowanych szpul filamentu przedstawiony został w tab. 5.35. Na potrzeby niniejszego procesu należy zapewnić filament w postaci dwóch szpul o wadze 0,5 kg i dwóch o wadze 2,5 kg. Sumaryczny koszt zakupu materiału produkcyjnego wynosi 458,72 zł netto, co w przeliczeniu na jeden wytworzony model wynosi 0,92 zł. Łączny odpad materiału stanowi 4,2 %.

Tab. 5.35. Wykaz zastosowanych szpul filamentu

Waga szpuli [kg]	Liczba szpul	Cena jednostkowa [zł]	Koszt [zł]	Waga materiału [kg]	Odpad
0,5	2	43,37	86,74	1,0	1x5,5g 1x235,5g
2,5	2	185,99	371,98	5,0	2x4,5g
Łącznie	4	-	458,72	6,0	250 g
Koszt netto materiału w przeliczeniu na jeden element: 0,92 zł					

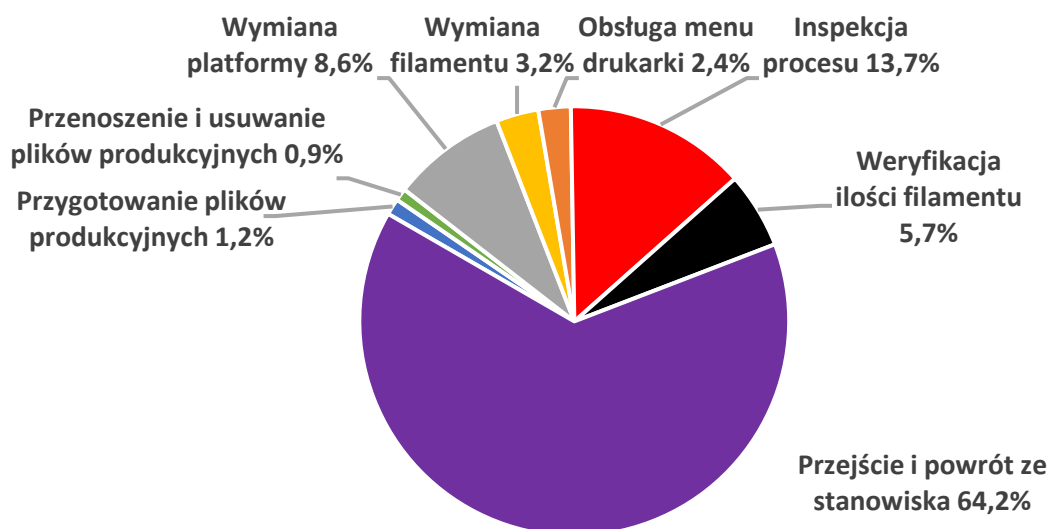
Ilość poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w konwencjonalnym trybie pracy przedstawia tab. 5.26. Sumaryczny czas pracy operatora w tym trybie wynosi:

$$T_{OP-KONWENCJONALNY} = 5 \text{ godz } 35 \text{ min } 05 \text{ sek}$$

Tab. 5.36. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora - tryb konwencjonalny

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	3	0:04:09
2	Przenoszenie i usuwanie plików produkcyjnych	4	0:03:08
3	Wymiana platformy	27	0:28:48
4	Wymiana filamentu	4	0:10:44
5	Obsługa menu drukarki	35	0:08:10
6	Inspekcja procesu	54	0:45:54
7	Weryfikacja ilości filamentu	16	0:19:12
8	Przejsie i powrót ze stanowiska	43	3:35:00

Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.17. Zaobserwować można znaczny udział czasu związany z przejściem i powrotem operatora ze stanowiska wytwarzania. Rozbieżność pomiędzy czasem pozostałych czynności operatora jest znacznie niższa w porównaniu do procesów wytwarzania korpusu przekładni i koła zębatego KZ-1 o takim samym wolumenie produkcji. Ma to związek z ogólną redukcją czynności wykonywanych przez operatora ze względu na konsolidację większej liczby modeli 3D podczas pojedynczego wydruku.



Rys. 5.17. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora - tryb konwencjonalny

Ilość wraz z czasem trwania poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w trybie pracy z pierwszym trybem automatyzacji przedstawione zostały w tab. 5.37. W stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym zauważyć można redukcję liczby przejść i powrotów operatora ze stanowiska pracy (z 43 do 15). Część pozycji pozostaje stała (przygotowanie plików produkcyjnych, wymiana platformy). Wymiana platformy w dalszym ciągu zajmuje taką samą ilość czasu. Pozycja „obsługa aplikacji” jest odpowiednikiem „obsługi menu drukarki 3D” w trybie konwencjonalnym – w omawianym przypadku nie odnotowano znaczącej różnicy czasu trwania tych operacji. Ponadto odpadły pozycje związane z obsługą plików produkcyjnych, inspekcją procesu oraz weryfikacją stanu filamentu – operacje te wykonywane są automatycznie poprzez aplikację nadzorującą proces wytwarzania. Sumaryczny czas pracy operatora w trybie z pierwszym stopniem automatyzacji wynosi:

$$T_{OP-AUTO 1} = 1 \text{ godz } 58 \text{ min } 57 \text{ sek}$$

Tab. 5.37. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora – pierwszy stopień automatyzacji

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	3	0:04:09
2	Obsługa aplikacji	31	0:08:41
3	Wymiana platformy	27	0:28:48
4	Wymiana filamentu	4	0:06:28
5	Przejsie i powrot ze stanowiska	15	1:15:00

Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.18. Zaobserwować można znaczący udział czasu związany z przejściami i powrotami operatora ze stanowiska wytwarzania oraz wymianą platformy. Są to czynności, których liczbę można zredukować wprowadzając drugi stopień automatyzacji.



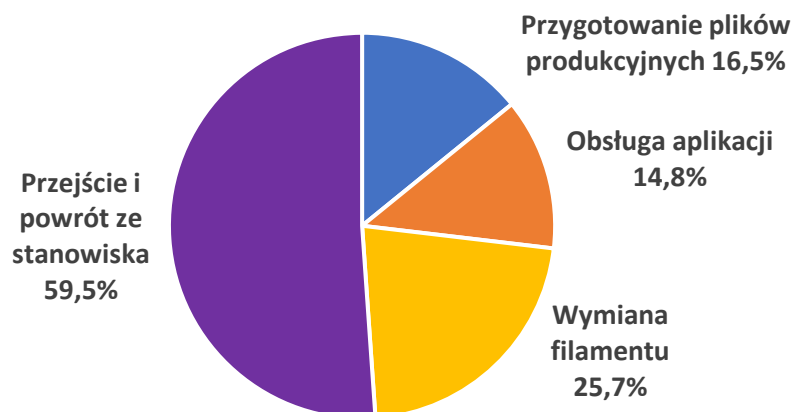
Rys. 5.18. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora – pierwszy stopień automatyzacji

Wykaz poszczególnych operacji wykonywanych przez operatora w trybie pracy z drugim stopniem automatyzacji przedstawiony został w tab. 5.38. Ilość przejść i powrotów do stanowiska wytwórczego zredukowana została do zaledwie trzech (uzbrojenie, przezbrowienie i końcowe rozbrojenie maszyn produkcyjnych). Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora przedstawiony został na rys. 5.19. Sumaryczny czas pracy operatora w tym trybie pracy wynosi:

$$T_{OP-AUTO 2} = 25 \text{ min } 12 \text{ sek}$$

Tab. 5.38. Wykaz liczby operacji i czasu pracy operatora – drugi stopień automatyzacji

Lp.	Czynność	Liczba operacji	Czas wykonania
1	Przygotowanie plików produkcyjnych	3	0:04:09
2	Obsługa aplikacji	4	0:03:44
3	Wymiana filamentu	4	0:06:28
4	Przejście i powrót ze stanowiska	3	0:15:00



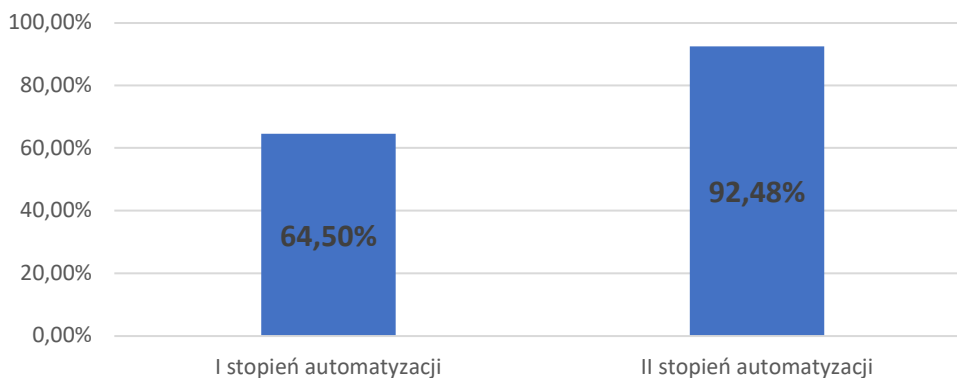
Rys. 5.19. Udział poszczególnych czynności względem całkowitego czasu pracy operatora – drugi stopień automatyzacji

Zestawienie czasu pracy operatora w poszczególnych trybach wytwarzania oraz kosztów z tym związanych przedstawiono w tab. 5.39. Założono przy tym koszt godziny pracy operatora równy 60 zł.

Tab. 5.39. Wykaz czasu pracy operatora, drukarek 3d i realizacji zamówienia

Model pracy	Czas pracy operatora	Koszt pracy operatora [zł]
Konwencjonalny	5:35:05	335,08
Automatyzacja I stopnia	1:58:57	118,95
Automatyzacja II stopnia	0:25:12	25,20

Wykres na rys. 5.20 przedstawia stopień redukcji czasu pracy i kosztów pracy operatora w stosunku do konwencjonalnego trybu pracy. Automatyzacji procesu pozwoliła na redukcję tych wartości odpowiednio o 64,50% (pierwszy stopień automatyzacji) oraz o 92,48% (drugi stopień automatyzacji).



Rys. 5.20. Redukcja kosztów i czasu pracy operatora w stosunku do pracy w trybie manualnym

Czas wykorzystania parku maszynowego określony został na podstawie łącznej liczby wykonanych wydruków, ilości zastosowanych drukarek 3D w procesie oraz czasu trwania wydruku pojedynczego modelu z uwzględnieniem czynności przygotowania do kolejnego wydruku.

$$T_{PM} = \frac{500 * 1:18:00 + 27 * 0:02:00}{2} \approx 325,27 \text{ godz}$$

Koszty związane z wykorzystaniem parku maszynowego w poszczególnych trybach pracy przedstawione zostały w tab. 5.40. Najwyższe koszty pracy parku maszynowego odnotowano dla konwencjonalnego, najniższe natomiast podczas pracy w środowisku wytwórczym z pierwszym stopniem automatyzacji.

Tab. 5.40. Koszty pracy parku maszynowego

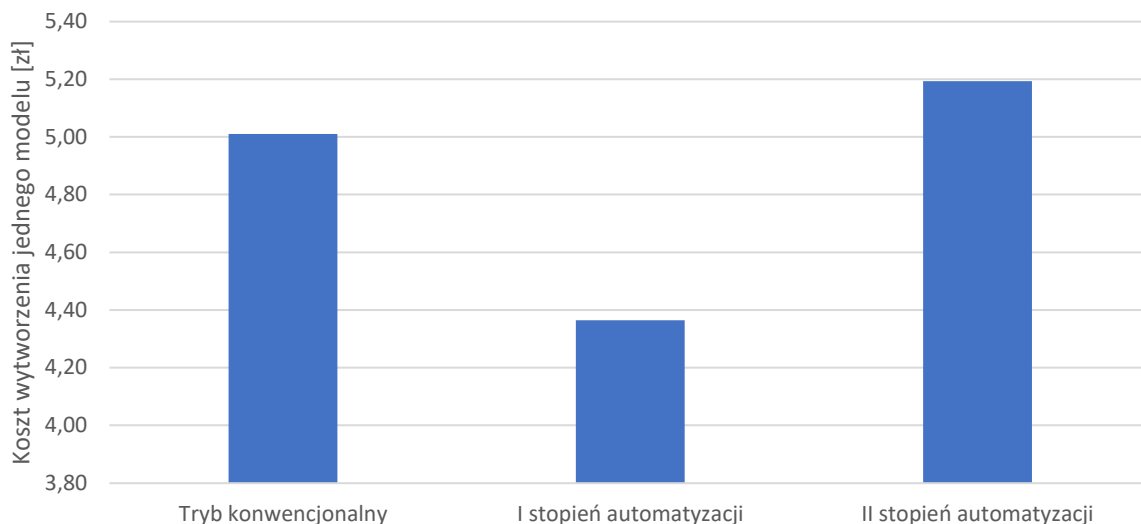
Model pracy	Godzinny koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	Koszt pracy parku maszynowego [zł]
Konwencjonalny	6,67	2169,65
Automatyzacja I stopnia	6,34	2063,24
Automatyzacja II stopnia	7,90	2571,33

Łączne koszty wytworzenia przedstawione zostały w tab. 5.41. Są to koszty związane z pracą operatora i parku maszynowego. Nie zostały uwzględnione koszty materiału oraz prac wykończeniowych w ramach czynności post-processingu.

Tab. 5.41. Obliczone koszty wytworzenia

Model pracy	Koszt łącznie [zł]	Koszt jednego modelu [zł]
Konwencjonalny	2504,73	5,01
Automatyzacja I stopnia	2182,19	4,36
Automatyzacja II stopnia	2596,53	5,19

Przedstawiony przypadek jest jednym z niewielu procesów, w którym wprowadzenia drugiego stopnia automatyzacji przyczyniło się do podniesienia kosztów wytwarzania w stosunku do konwencjonalnego trybu wytwarzania. Związane jest to z wysokim kosztem układu robotycznego i niskim stopniem jego wykorzystania – współpraca z zespołem wytwórczym o małej ilości drukarek 3D podczas długich wydruków. W obszarze tym zastosowanie znajduje natomiast pierwszy stopień automatyzacji. Wytwarzanie w tym trybie generuje niższe koszty w stosunku do trybu konwencjonalnego (rys. 5.21).



Rys. 5.21. Porównanie kosztów wytworzenia w poszczególnych trybach pracy

5.5. Przedstawienie wyników

5.5.1. Koło zębate KZ-1

Wyniki oraz założone parametry symulacji procesu wytwarzania dla modelu dużego koła przedstawione zostały w tab. 5.42 (mały zespół produkcyjny), tab. 5.43 (średni zespół produkcyjny) i tab. 5.44 (duże zespoły produkcyjne). Koszt pracy operatora określony został na poziomie 60 zł/godz. W konwencjonalnym trybie wytwarzania do jego zadań należy m.in. dwukrotne wykonanie inspekcji przebiegu procesu w trakcie pojedynczego wydruku oraz dwukrotna weryfikacja ilości filamentu na każdy zużyty kilogram. We wszystkich przypadkach zastosowany został ten sam plik produkcyjny, zawierający jeden model na platformie roboczej.

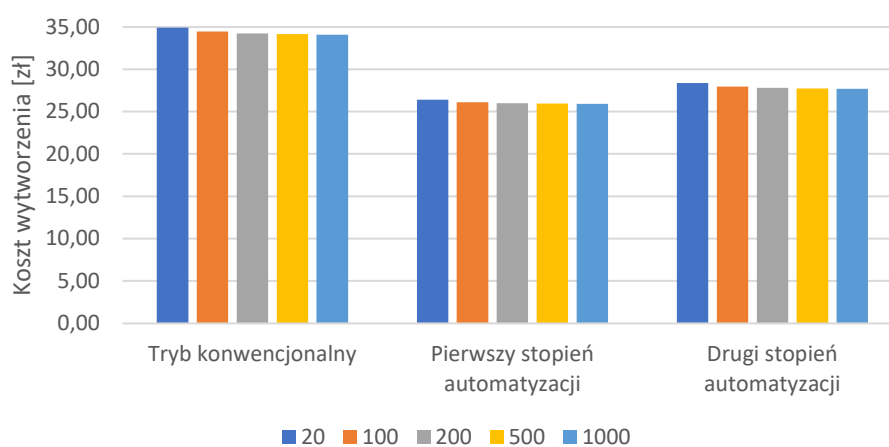
Symulacje dla małego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 20, 100, 200, 500 i 1000 sztuk. W każdym przypadku do wytwarzania wykorzystane zostały wszystkie dostępne drukarki 3D. Czas pracy parku maszynowego dla poszczególnych partii wynosi odpowiednio: 69,67, 348,33, 696,67, 1741,7 i 3483,3 godziny.

Tab. 5.42. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla małych zespołów produkcyjnych (2 drukarki 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	2	2	2	2	2	
	Liczba sztuk w partii	20	100	200	500	1000	
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	2	2	2	2	2	
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	
	Liczba wydruków	20	100	200	500	1000	
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	10	51	101	252	500	
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	1	1	1	1	
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]	1,58	7,9	15,8	39,5	79	
	Koszt zakupu filamentu [zł]	151	907	1 540	3 716	7 432	
	Liczba szpul filamentu	2	7	9	17	34	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce	1	4	5	9	17	
Parametry wyjściowe	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Czas pracy parku maszynowego [godz]	69,67	348,33	696,67	1741,7	3483,3
		Liczba wymian filamentu	2	7	9	17	34
	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Liczba inspekcji	40	200	400	1000	2000
		Liczba weryfikacji filamentu	6	23	41	96	192
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	31	154	304	757	1501
		Czas pracy operatora [godz]	3,89	18,72	36,68	90,92	180,67
		Koszt pracy operatora [zł]	233	1 123	2 201	5 455	10 840
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	464	2 322	4 644	11 611	23 222
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	698	3 446	6 845	17 066	34 062
	I STOPIEN AUTOMATYZACJI	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	34,90	34,46	34,23	34,13	34,06
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	11	52	102	253	501
		Czas pracy operatora [godz]	1,44	6,68	12,99	32,06	63,65
Redukcja czasu pracy operatora [%]		62,9%	64,3%	64,6%	64,7%	64,8%	
	Koszt pracy operatora [zł]	87	401	779	1 924	3 819	

II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	442	2 208	4 417	11 042	22 083
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	528	2 609	5 196	12 965	25 902
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	26,41	26,09	25,98	25,93	25,90
	Liczba przejść i powrotów stanowiska	2	5	6	10	18
	Czas pracy operatora [godz]	0,28	0,68	0,82	1,39	2,57
	Redukcja czasu pracy operatora [%]	92,9%	96,4%	97,8%	98,5%	98,6%
	Koszt pracy operatora [zł]	17	41	49	84	154
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	551	2 754	5 508	13 771	27 542
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	567	2 795	5 558	13 855	27 696
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	28,37	27,95	27,79	27,71	27,70

Wykres na rys. 5.22 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła. Najwyższe koszty (34,06 - 34,90 zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym. Natomiast najniższe koszty produkcji (25,90 - 26,41 zł) odnotowane zostały podczas wytwarzania w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji. Produkcja w tym środowisku wygenerowała koszty niższe średnio o 8,29 zł w stosunku do produkcji w trybie konwencjonalnym. Implementacja drugiego stopnia automatyzacji wygenerowała średnio koszty niższe o 6,45 zł w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym i wyższe średnio o 1,84 w stosunku do produkcji w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji.



Rys. 5.22. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 2 drukarek 3D

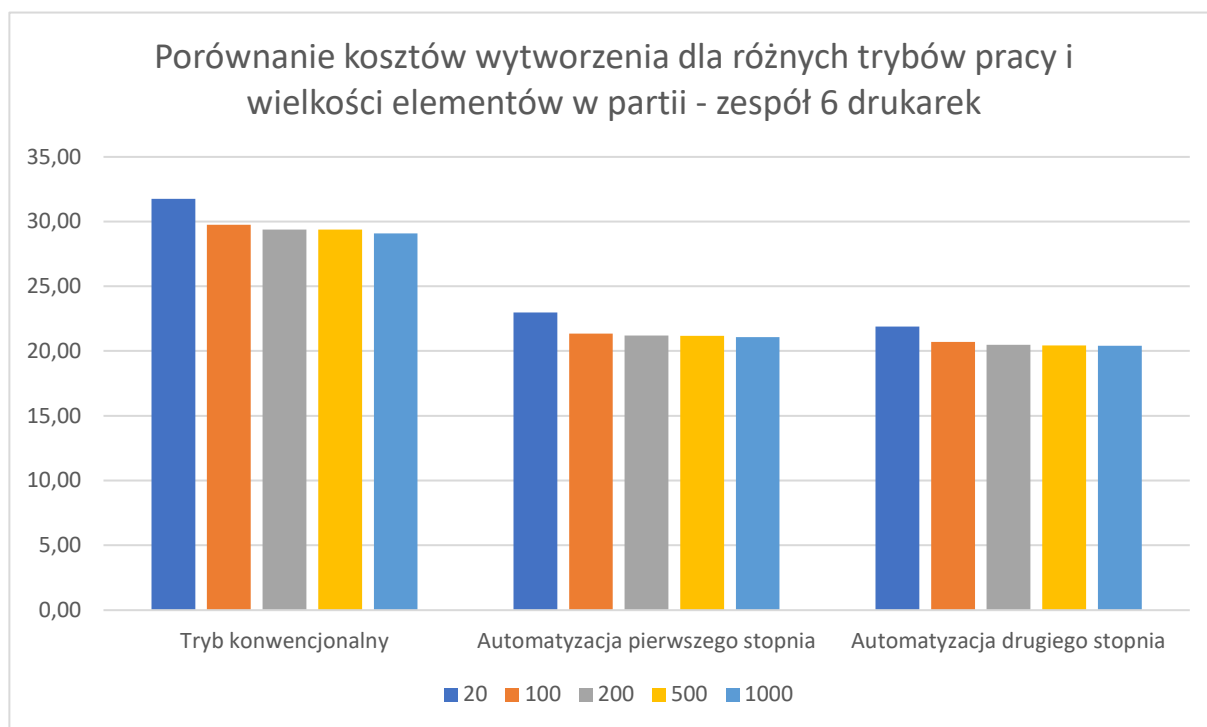
Symulacje dla średniego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 20, 100, 200, 500 i 1000 sztuk. W przypadku partii 20 sztuk, wykorzystane zostały 4 z 6 dostępnych drukarek 3D, gdyż wykorzystanie wszystkich dostępnych maszyn wiązało się z koniecznością zakupu większej liczby szpul materiału i wygenerowaniem większej ilości materiału odpadowego. W pozostałych przypadkach w procesie wytwarzania wykorzystany został pełny park maszynowy. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 34,83, 116,11, 232,22, 580,56 i 1161,11 godzin.

Tab. 5.43. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla średnich zespołów produkcyjnych (6 drukarki 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	6	6	6	6	6	
	Liczba sztuk w partii	20	100	200	500	1000	
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	4	6	6	6	6	
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	
	Liczba wydruków	20	100	200	500	1000	
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	5	18	36	93	167	
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	1	1	1	1	
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]	1,58	7,9	15,8	39,5	79	
	Koszt zakupu filamentu [zł]	181	681	1 252	3 021	7 421	
	Liczba szpul filamentu	4	11	9	17	36	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce	1	2	2	3	6	
Parametry wyjściowe	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Czas pracy parku maszynowego [godz]	34,83	116,11	232,22	580,56	1161,11
		Liczba wymian filamentu	4	11	9	17	36
	Liczba inspekcji	40	200	400	1000	2000	
	Liczba weryfikacji filamentu	8	27	41	96	194	
	Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	16	55	109	280	502	
	Czas pracy operatora [godz]	2,85	10,88	20,57	51,31	97,69	
	Koszt pracy operatora [zł]	171	653	1 234	3 078	5 861	
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	13,33	20,00	20,00	20,00	20,00	
Koszt pracy parku maszynowego [zł]	464	2 322	4 644	11 611	23 222		

		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	635	2 975	5 878	14 689	29 083	
		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	31,76	29,75	29,39	29,38	29,08	
	I STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	6	19	37	94	168	
		Czas pracy operatora [godz]	1,09	4,05	7,57	18,81	35,96	
		Redukcja czasu pracy operatora [%]	61,8%	62,8%	63,2%	63,3%	63,2%	
		Koszt pracy operatora [zł]	65	243	454	1 129	2 158	
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	11,32	16,29	16,29	16,29	16,29	
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	394	1 892	3 783	9 458	18 915	
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	459	2 134	4 237	10 586	21 073	
		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	22,97	21,34	21,19	21,17	21,07	
		II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów stanowiska	2	3	3	4	7
			Czas pracy operatora [godz]	0,34	0,63	0,57	0,89	1,71
	Redukcja czasu pracy operatora [%]		88,2%	94,2%	97,2%	98,3%	98,2%	
	Koszt pracy operatora [zł]		20	38	34	54	103	
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		11,99	17,50	17,50	17,50	17,50	
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]		418	2 031	4 063	10 157	20 314	
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]		438	2 069	4 097	10 211	20 417	
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]		21,89	20,69	20,49	20,42	20,42	

Wykres na rys. 5.23 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła podczas produkcji z wykorzystaniem średniej wielkości zespołu drukarek 3D - 6 sztuk. Najwyższe koszty (29,08 - 31,76zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym a najniższe (20,42- 21,89zł) odnotowane zostały dla produkcji w środowisku o drugim stopniu automatyzacji. Produkcja w tym środowisku wygenerowała koszty niższe średnio o 9,09 zł w porównaniu do produkcji w trybie konwencjonalnym. Koszty wytwarzania w środowiskach zautomatyzowanych są na podobnym poziomie, przy czym w przypadku środowiska o drugim stopniu automatyzacji są średnio niższe o 0,77 zł.



Rys. 5.23. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 6 drukarek 3D

Symulacje dla dużego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 100, 200, 500 i 1000 sztuk. Plan procesu produkcji 20 sztuk był tożsamy z produkcją w strukturze 6 drukarek 3D. Dla partii 100 i 200 sztuk plan zakładał wykorzystanie jedynie 9 z spośród 12 dostępnych drukarek 3D. Wykorzystanie większej ich liczby generowało wysokie koszty związane z zakupem materiału oraz duży jego odpad poprodukcyjny. Park maszynowy został w pełni wykorzystany jedynie w przypadku partii 500 i 1000 elementów. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 77,41, 154,81, 290,28 i 580,56 godzin.

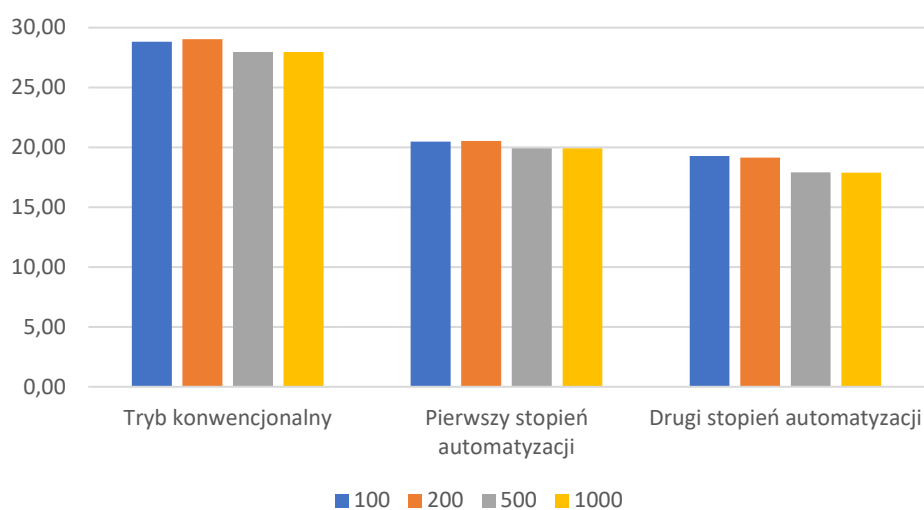
Symulacje dla bardzo dużego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 500 i 1000 sztuk. Plany procesów dla pozostałych wielkości partii były tożsame z planami produkcji w mniejszych zespołach produkcyjnych. Możliwości parku maszynowego zostały w pełni wykorzystane jedynie podczas wytwarzania partii 1000 sztuk. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 204,90 i 232,22 godzin.

Tab. 5.44. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla dużych zespołów produkcyjnych (12 i 30 drukarek 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	6	
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	12	12	12	12	30	30	
	Liczba sztuk w partii	100	200	500	1000	500	1000	
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	9	9	12	12	17	30	
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	60	
	Liczba wydruków	100	200	500	1000	500	1000	
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	12	31	43	93	31	37	
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	1	1	1	1	1	
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]	7,9	15,8	39,5	79	39,5	79	
	Koszt zakupu filamentu [zł]	650	1 540	3 786	6 042	3 716	6 124	
	Liczba szpul filamentu	9	9	24	34	17	42	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce	1	1	2	3	1	2	
	Parametry wyjściowe	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Czas pracy parku maszynowego [godz]	77,41	154,81	290,28	580,56	204,90
Liczba wymian filamentu			9	9	24	34	17	42
WYTWARZANIE KONWENCJONALNE		Liczba inspekcji	200	400	1000	2000	1000	2000
		Liczba weryfikacji filamentu	25	41	103	192	96	200
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	37	94	130	280	94	112
		Czas pracy operatora [godz]	9,35	19,42	39,49	79,26	36,18	66,41
		Koszt pracy operatora [zł]	561	1 165	2 369	4 755	2 171	3 985
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	30,00	30,00	40,00	40,00	56,67	100,00
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	2 322	4 644	11 611	23 222	11 611	23 222
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	2 883	5 810	13 980	27 977	13 782	27 207
I STOPIEŃ AUTOMATYZACJI		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	28,83	29,05	27,96	27,98	27,56	27,21
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	13	32	44	94	32	38
		Czas pracy operatora [godz]	3,49	7,15	14,85	29,74	13,64	25,31
		Redukcja czasu pracy operatora [%]	62,7%	63,2%	62,4%	62,5%	62,3%	61,9%
	Koszt pracy operatora [zł]	209	429	891	1 784	819	1 519	

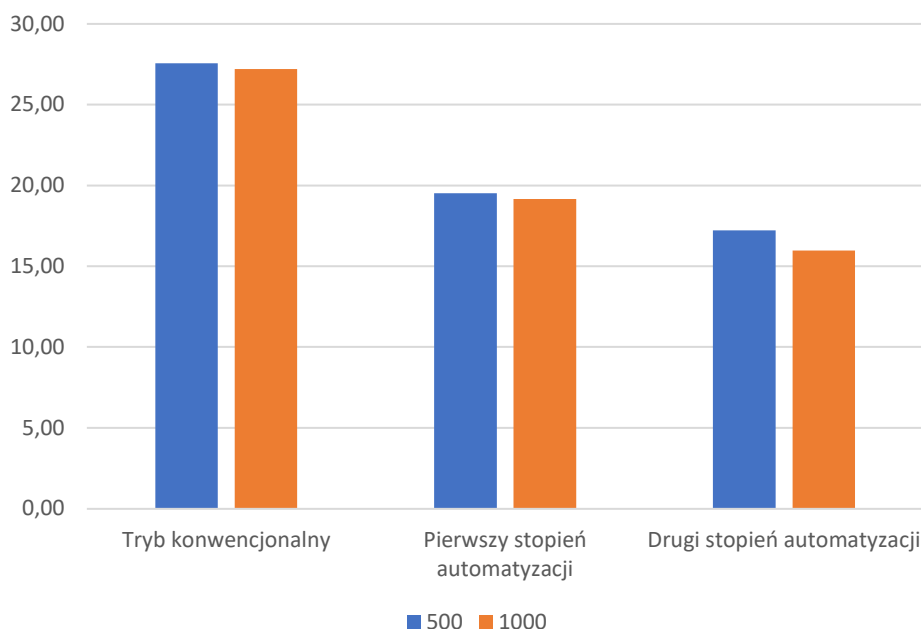
II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	23,75	23,75	31,22	31,22	43,66	76,00
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	1 839	3 678	9 062	18 124	8 945	17 648
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	2 048	4 107	9 953	19 908	9 764	19 167
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	20,48	20,53	19,91	19,91	19,53	19,17
	Liczba przejść i powrotów stanowiska	2	2	3	4	2	3
	Czas pracy operatora [godz]	0,49	0,49	1,02	1,40	0,73	1,56
	Redukcja czasu pracy operatora [%]	94,8%	97,5%	97,4%	98,2%	98,0%	97,7%
	Koszt pracy operatora [zł]	29	29	61	84	44	94
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	24,54	24,54	30,67	30,67	41,80	68,34
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	1 899	3 799	8 901	17 803	8 564	15 871
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	1 929	3 828	8 963	17 887	8 608	15 964
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	19,29	19,14	17,93	17,89	17,22	15,96

Wykres na rys. 5.24 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła podczas produkcji z wykorzystaniem dużego zespołu drukarek 3D (12 sztuk). Najwyższe koszty (27,21 - 29,05 zł) odnotowane zostały podczas wytwarzania w trybie konwencjonalnym a najniższe (17,89 – 19,29 zł) dla produkcji w środowisku z drugim stopniem automatyzacji. Produkcja w tym środowisku wygenerowała koszty niższe średnio o 9,89 zł w stosunku do produkcji w trybie konwencjonalnym. Koszty produkcji w środowisku z pierwszym stopniem automatyzacji są natomiast wyższe średnio o 1,65 zł w stosunku do produkcji w środowisku z drugim stopniem automatyzacji.



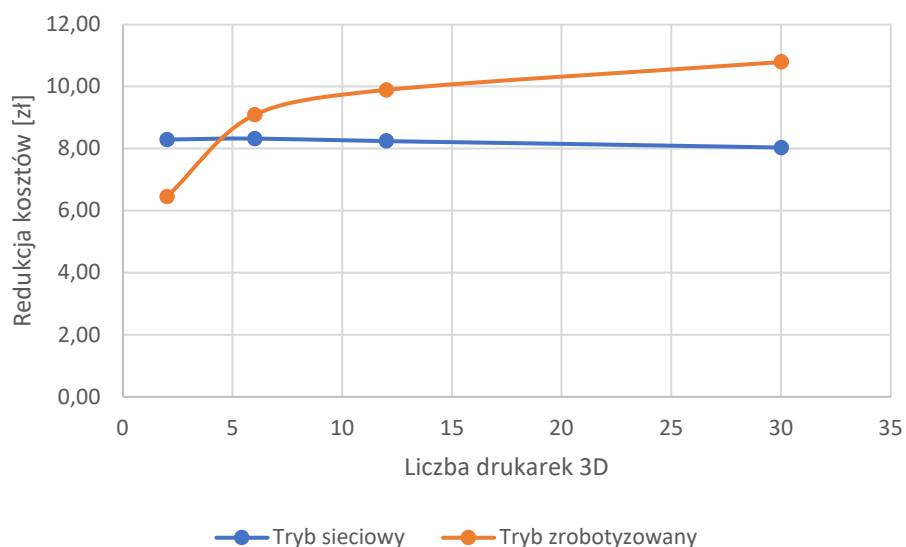
Rys. 5.24. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 12 drukarek 3D

Wykres na rys. 5.25 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła podczas produkcji z wykorzystaniem bardzo dużego zespołu drukarek 3D (30 sztuk). Najwyższe koszty (27,21 - 27,56zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym. Wprowadzenie automatyzacji do środowiska wytwórczego obniżyło koszty wytwarzania. Najniższe koszty produkcji (15,96 - 17,22zł) odnotowane zostały dla produkcji w środowisku o drugim stopniu automatyzacji. Produkcja w tym środowisku wygenerowała koszty niższe średnio o 10,80 zł w stosunku do produkcji w trybie konwencjonalnym. Koszty produkcji w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji są natomiast wyższe średnio o 2,76 zł w stosunku do środowiska z drugim stopniem automatyzacji.



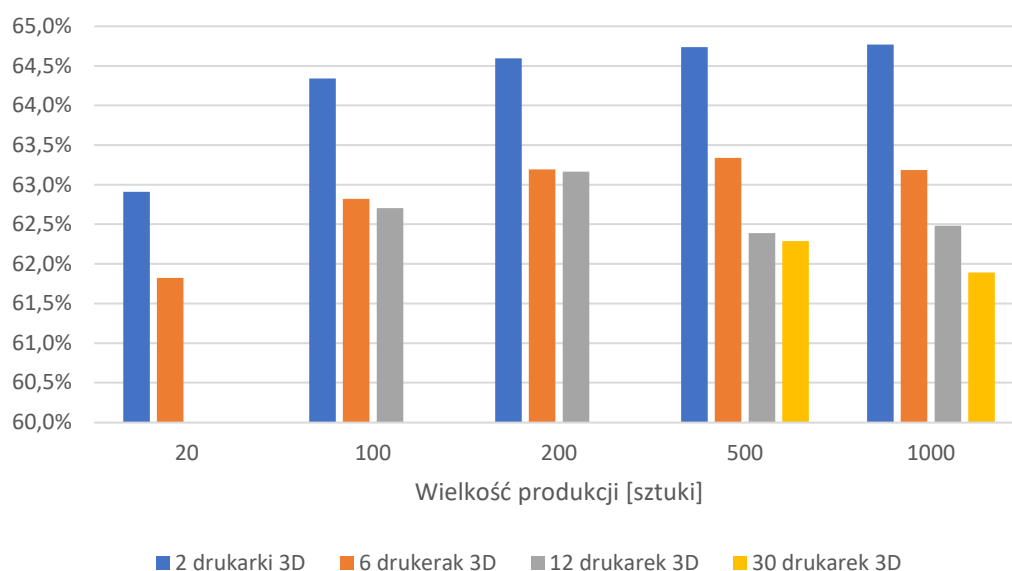
Rys. 5.25. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 30 drukarek 3D

Wykres na rys. 5.26 przedstawia zestawienie redukcji kosztów wytwarzania w zależności od liczby drukarek 3D podczas pracy w środowiskach zautomatyzowanych w stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym. W przypadku pierwszego stopnia automatyzacji wartość ta jest mniej więcej stała we wszystkich przypadkach. Natomiast w środowisku o drugim stopniu automatyzacji redukcja kosztów rośnie wraz ze zwiększeniem ilości urządzeń w parku maszynowym. Punkt przecięcia linii na wykresie określa rozmiar struktury drukarek 3D, w której ekonomicznie uzasadnione jest wprowadzenie drugiego stopnia automatyzacji. Dla modelu koła zębatego KZ-1, gdzie czasu wydruku pojedynczego modelu wynosi około 7 godzin, są to struktury zbudowane z więcej niż czterech drukarek 3D.

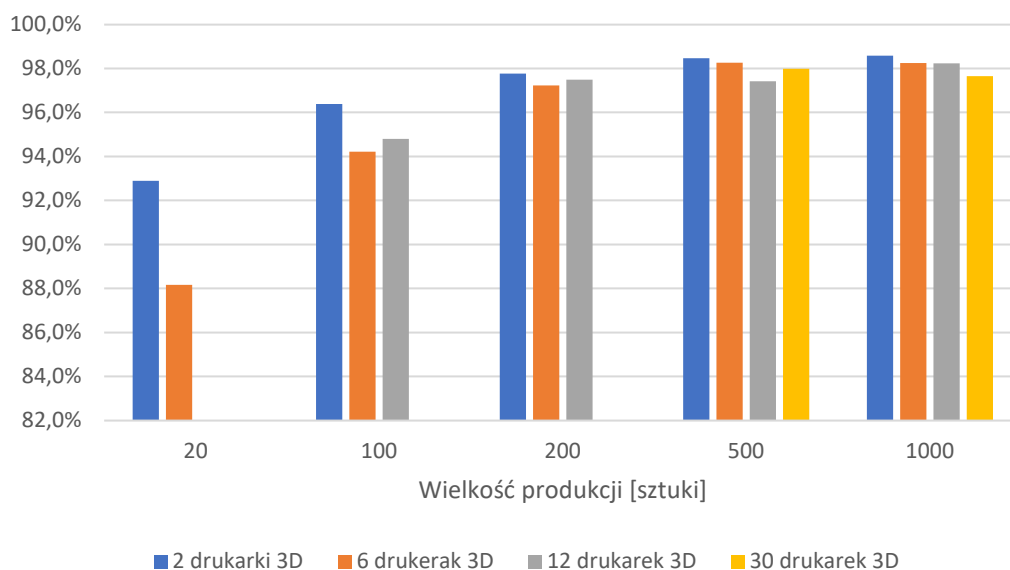


Rys. 5.26. Wykres redukcji kosztów wytwarzania w zależności od liczby drukarek 3D

Redukcja kosztów wytwarzania jest wynikiem zarówno zmniejszenia godzinowego kosztu pracy parku maszynowego jak i redukcji ogólnego czasu pracy operatora. Wykresy na rys. 5.27 i rys. 5.28 przedstawiają stopień redukcji czasu pracy operatora w środowiskach zautomatyzowanych w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym. Oszacowana wartość redukcji czasu waha się w przedziale od 61,8 do 64,8 % - I stopień automatyzacji oraz od 88,2 do 98,6 % - II stopień automatyzacji.



Rys. 5.27. Redukcja czasu pracy operatora – pierwszy stopień automatyzacji



Rys. 5.28. Redukcja czasu pracy operatora – drugi stopień automatyzacji

5.5.2. Korpus przekładni

Wyniki oraz założone parametry symulacji procesu wytwarzania dla modelu korpusu przekładni przedstawione zostały w tab. 5.45 (mały zespół produkcyjny), tab. 5.46 (średni zespół produkcyjny) i tab. 5.47 (duże zespoły produkcyjne). Koszt pracy operatora określony został na poziomie 60 zł/godz. W konwencjonalnym trybie pracy do jego zadań należy m.in. dwukrotne wykonanie inspekcji przebiegu procesu w trakcie pojedynczego wydruku oraz dwukrotna weryfikacja ilości filamentu na każdy zużyty kilogram. We wszystkich przypadkach zastosowany został ten sam plik produkcyjny zawierający jeden model na platformie roboczej.

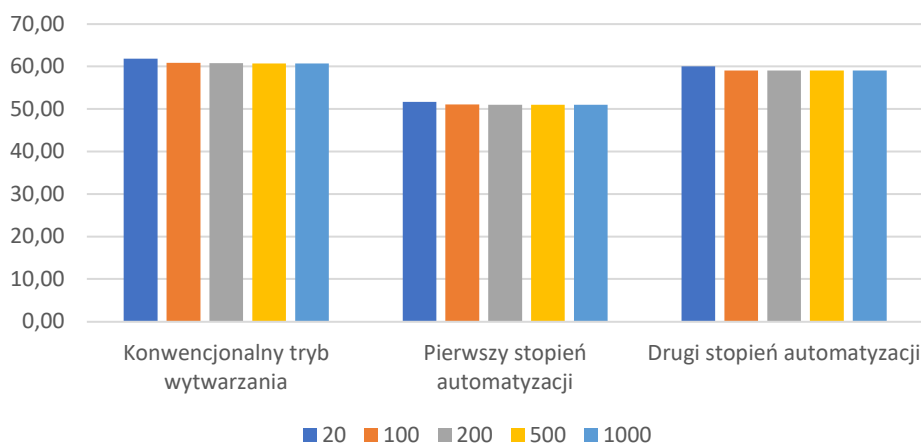
Symulacje dla małego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 20, 100, 200, 500 i 1000 sztuk. W każdym przypadku do wytwarzania wykorzystane zostały wszystkie dostępne drukarki 3D. Czas pracy parku maszynowego dla poszczególnych partii wynosi odpowiednio: 148,67, 743,33, 1486,7, 3716,7 i 7433,3 godziny.

Tab. 5.45. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla małych zespołów produkcyjnych (2 drukarki 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	2	2	2	2	2	
	Liczba sztuk w partii	20	100	200	500	1000	
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	2	2	2	2	2	
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	
	Liczba wydruków	20	100	200	500	1000	
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	10	50	100	250	500	
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	1	1	1	1	
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]	3,42	17,1	34,2	85,5	171	
	Koszt zakupu filamentu [zł]	420	1 420	2 819	7 048	13 951	
	Liczba szpul filamentu	4	6	12	30	62	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce	2	3	6	15	31	
Parametry wyjściowe	Czas pracy parku maszynowego [godz]	148,67	743,33	1486,67	3716,67	7433,33	
		Liczba wymian filamentu	4	6	12	30	62
	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Liczba inspekcji	40	200	400	1000	2000
		Liczba weryfikacji filamentu	11	41	81	201	404
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	31	151	301	751	1501
		Czas pracy operatora [godz]	4,09	18,79	37,38	93,15	186,27
		Koszt pracy operatora [zł]	245	1 127	2 243	5 589	11 176
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	991	4 956	9 911	24 778	49 555
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	1 236	6 083	12 154	30 367	60 731
		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	61,82	60,83	60,77	60,73	60,73
	I STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	11	51	101	251	501
		Czas pracy operatora [godz]	1,50	6,56	12,99	32,28	64,49
Redukcja czasu pracy operatora [%]		63,2%	65,1%	65,2%	65,3%	65,4%	
Koszt pracy operatora [zł]		90	394	780	1 937	3 870	

II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	942	4 712	9 425	23 562	47 125
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	1 033	5 106	10 205	25 499	50 994
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	51,63	51,06	51,02	51,00	50,99
	Liczba przejść i powrotów stanowiska	3	4	7	16	32
	Czas pracy operatora [godz]	0,42	0,56	0,99	2,28	4,58
	Redukcja czasu pracy operatora [%]	89,7%	97,0%	97,3%	97,5%	97,5%
	Koszt pracy operatora [zł]	25	34	60	137	275
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	1 175	5 874	11 748	29 370	58 741
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	1 200	5 908	11 808	29 507	59 015
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	60,00	59,08	59,04	59,01	59,02

Wykres na rys. 5.29 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu korpusu. Najwyższe koszty (60,73 - 61,82 zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym. Najniższe natomiast (50,99 – 51,63zł) dla produkcji w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji. Produkcja w tym środowisku wygenerowała koszty niższe średnio o 9,74 zł w stosunku do produkcji w trybie konwencjonalnym. Wprowadzenie drugiego stopnia automatyzacji spowodowało tylko nieznaczne obniżenie kosztów produkcji w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym – średnio o 1,75 zł.



Rys. 5.29. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 2 drukarek

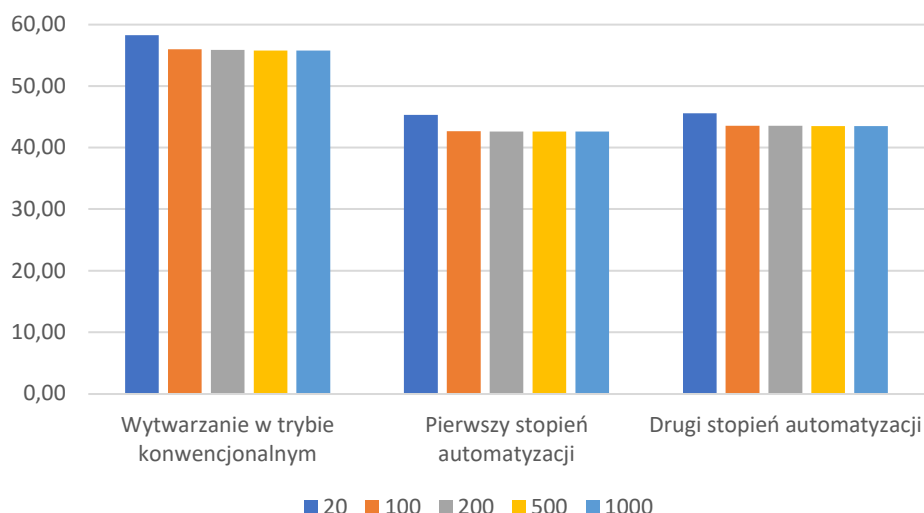
Symulacje dla średniego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 20, 100, 200, 500 i 1000 sztuk. W przypadku partii 20 sztuk, wykorzystane zostały 4 z 6 dostępnych drukarek 3D, gdyż wykorzystanie wszystkich dostępnych maszyn wiązało się z koniecznością zakupu większej liczby szpul materiału i wygenerowaniem większej ilości materiału odpadowego. W pozostałych przypadkach w procesie wytwarzania wykorzystany został pełny park maszynowy. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 74,33, 247,78, 495,56, 1238,89 i 2477,78 godzin.

Tab. 5.46. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla średnich zespołów produkcyjnych (6 drukarki 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	6	6	6	6	6	
	Liczba sztuk w partii	20	100	200	500	1000	
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	4	6	6	6	6	
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	
	Liczba wydruków	20	100	200	500	1000	
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	5	17	34	84	170	
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	1	1	1	1	
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]	3,42	17,1	34,2	85,5	171	
	Koszt zakupu filamentu [zł]	420	1 420	2 819	7 048	13 863	
	Liczba szpul filamentu	4	6	12	30	59	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce	1	1	2	5	10	
	Parametry wyjściowe	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Czas pracy parku maszynowego [godz]	74,33	247,78	495,56	1238,89
Liczba wymian filamentu			4	6	12	30	59
Liczba inspekcji		40	200	400	1000	2000	
Liczba weryfikacji filamentu		11	41	81	201	401	
Liczba przejść i powrotów ze stanowiska		16	52	103	253	511	
Czas pracy operatora [godz]		2,91	10,67	21,01	51,79	103,70	
Koszt pracy operatora [zł]		174	640	1 261	3 107	6 222	
Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		13,33	20,00	20,00	20,00	20,00	
Koszt pracy parku maszynowego [zł]	991	4 956	9 911	24 778	49 555		

		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	1 165	5 596	11 172	27 885	55 777
		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	58,27	55,96	55,86	55,77	55,78
	I STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	6	18	35	85	171
		Czas pracy operatora [godz]	1,09	3,81	7,49	18,45	36,90
		Redukcja czasu pracy operatora [%]	62,6%	64,3%	64,3%	64,4%	64,4%
		Koszt pracy operatora [zł]	65	229	450	1 107	2 214
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	11,32	16,29	16,29	16,29	16,29
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	841	4 037	8 073	20 183	40 365
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	906	4 265	8 523	21 290	42 579
	II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	45,32	42,65	42,61	42,58	42,58
		Liczba przejść i powrotów stanowiska	2	2	3	6	11
		Czas pracy operatora [godz]	0,34	0,40	0,66	1,45	2,74
		Redukcja czasu pracy operatora [%]	88,4%	96,3%	96,9%	97,2%	97,4%
		Koszt pracy operatora [zł]	20	24	40	87	164
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	11,98	17,48	17,48	17,48	17,48
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	891	4 332	8 663	21 658	43 316
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	911	4 355	8 703	21 745	43 480
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	45,54	43,55	43,51	43,49	43,48	

Wykres na rys. 5.30 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu korpusu przy wykorzystaniu zespołu 6 drukarek 3D. Ponownie najwyższe koszty (55,77 – 58,27 zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym, a najniższe (42,58 – 45,32) dla produkcji w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji. Tym razem jednak koszty wytwarzania w środowisku o drugim stopniu automatyzacji są zbliżone i tylko minimalnie wyższe niż w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji.



Rys. 5.30. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów wytwarzania i wielkości elementów w partii - zespół 6 drukarek

Symulacje dla dużego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 200, 500 i 1000 sztuk. Plan procesu produkcji 20 i 100 sztuk był tożsamy z produkcją w strukturze 6 drukarek 3D. We wszystkich analizowanych przypadkach park maszynowy został wykorzystany w pełni. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 247,78, 619,44 i 1238,9 godzin.

Symulacje dla bardzo dużego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 100, 500 i 1000 sztuk. Plany procesów dla pozostałych wielkości partii były tożsame z planami produkcji w mniejszych zespołach produkcyjnych. Możliwości parku maszynowego zostały w pełni wykorzystane jedynie podczas wytwarzania partii 500 i 1000 sztuk. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 74,33, 247,78 i 495,56 godzin.

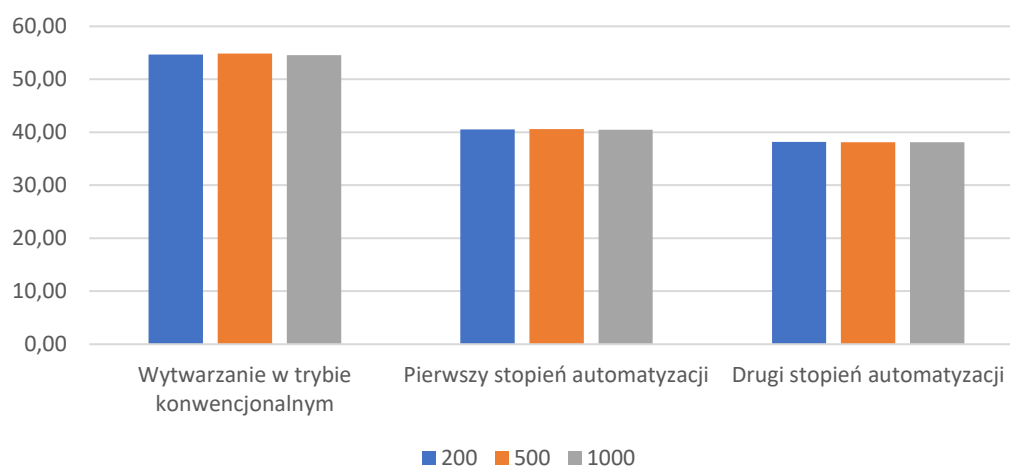
Tab. 5.47. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla dużych zespołów produkcyjnych (12 i 30 drukarek 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	6
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	12	12	12	30	30	30
	Liczba sztuk w partii	200	500	1000	100	500	1000
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	12	12	12	20	30	30
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	60
	Liczba wydruków	200	500	1000	100	500	1000
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	17	51	85	5	17	34
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	1	1	1	1	1

Parametry wyjściowe	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału		2	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk		2	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]		34,2	85,5	171	17,1	85,5	171	
	Koszt zakupu filamentu [zł]		2 819	6 976	13 863	2 097	6 976	13 863	
	Liczba szpul filamentu		12	31	59	20	31	59	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce		1	3	5	1	2	2	
	Czas pracy parku maszynowego [godz]		247,78	619,44	1238,89	74,33	247,78	495,56	
	Liczba wymian filamentu		12	31	59	20	31	59	
	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Liczba inspekcji		400	1000	2000	200	1000	2000
		Liczba weryfikacji filamentu		81	202	401	55	202	401
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska		52	154	256	16	52	103
		Czas pracy operatora [godz]		16,97	43,81	82,65	9,11	35,92	70,51
		Koszt pracy operatora [zł]		1 018	2 629	4 959	546	2 155	4 231
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		40,00	40,00	40,00	66,67	100,00	100,00
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]		9 911	24 778	49 555	4 956	24 778	49 555
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]		10 929	27 406	54 514	5 502	26 933	53 786
		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]		54,65	54,81	54,51	55,02	53,87	53,79
	I STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów ze stanowiska		18	52	86	6	18	35
		Czas pracy operatora [godz]		6,08	15,73	29,82	3,23	12,90	25,57
		Redukcja czasu pracy operatora [%]		64,2%	64,1%	63,9%	64,5%	64,1%	63,7%
Koszt pracy operatora [zł]		365	944	1 789	194	774	1 534		
Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		31,22	31,22	31,22	51,12	76,00	76,00		
Koszt pracy parku maszynowego [zł]		7 735	19 338	38 675	3 800	18 831	37 661		
Koszt wytworzenia łącznie [zł]		8 100	20 281	40 464	3 994	19 604	39 195		
Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]		40,50	40,56	40,46	39,94	39,21	39,20		
II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów stanowiska		2	4	6	2	3	3	
	Czas pracy operatora [godz]		0,58	1,31	2,32	0,82	1,23	2,07	
	Redukcja czasu pracy operatora [%]		96,6%	97,0%	97,2%	91,0%	96,6%	97,1%	
	Koszt pracy operatora [zł]		35	79	139	49	74	124	
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		30,64	30,64	30,64	47,88	68,28	68,28	

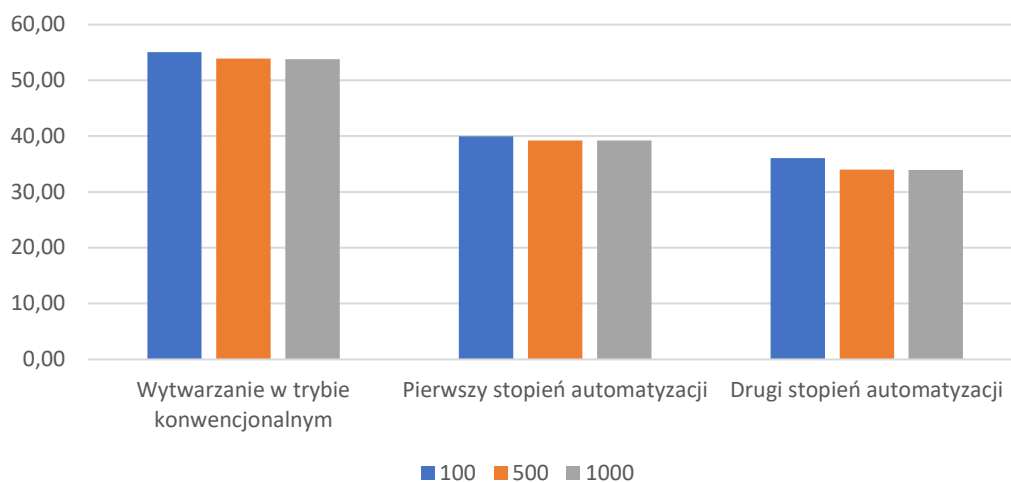
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	7 591	18 979	37 957	3 559	16 917	33 835
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	7 626	19 057	38 097	3 608	16 991	33 959
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	38,13	38,11	38,10	36,08	33,98	33,96

Wykres na Rys. 5.31 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu korpusu podczas produkcji z wykorzystaniem dużego zespołu drukarek 3D (12 sztuk). Najwyższe koszty (54,51 – 54,81 zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym. W analizowanych przypadkach najniższe koszty produkcji (38,10 – 38,13 zł) odnotowane zostały dla produkcji w środowisku o drugim stopniu automatyzacji. Wytwarzanie w tym środowisku wygenerowało koszty niższe średnio o 15,51 zł w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym. Koszty wytwarzania w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji, są zbliżone do kosztów wytwarzania w środowisku o drugim stopniu automatyzacji – są jednak wyższe średnio o 1,60 zł.



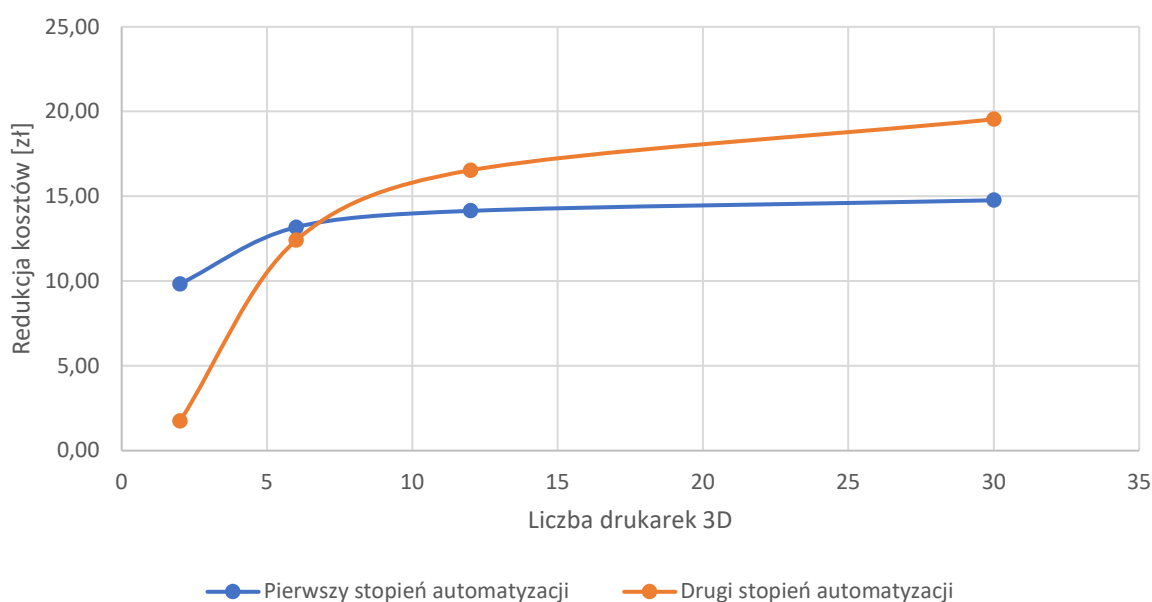
Rys. 5.31. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów wytwarzania i wielkości elementów w partii - zespół 12 drukarek

Wykres na rys. 5.32 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu korpusu przekładni podczas produkcji z wykorzystaniem bardzo dużego zespołu drukarek 3D (30 sztuk). Najwyższe koszty (53,79 – 55,02zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym, najniższe natomiast (33,96– 36,08 zł) dla produkcji w środowisku o drugim stopniu automatyzacji. Produkcja w tym środowisku wygenerowała koszty niższe średnio o 18,54 zł w stosunku do produkcji w trybie konwencjonalnym. Wprowadzenie pierwszego stopnia automatyzacji również wygenerowało koszty niższe w stosunku do tradycyjnego trybu pracy – średnio o Koszty produkcji w trybie wspomaganym są wyższe średnio o 14,56 zł.



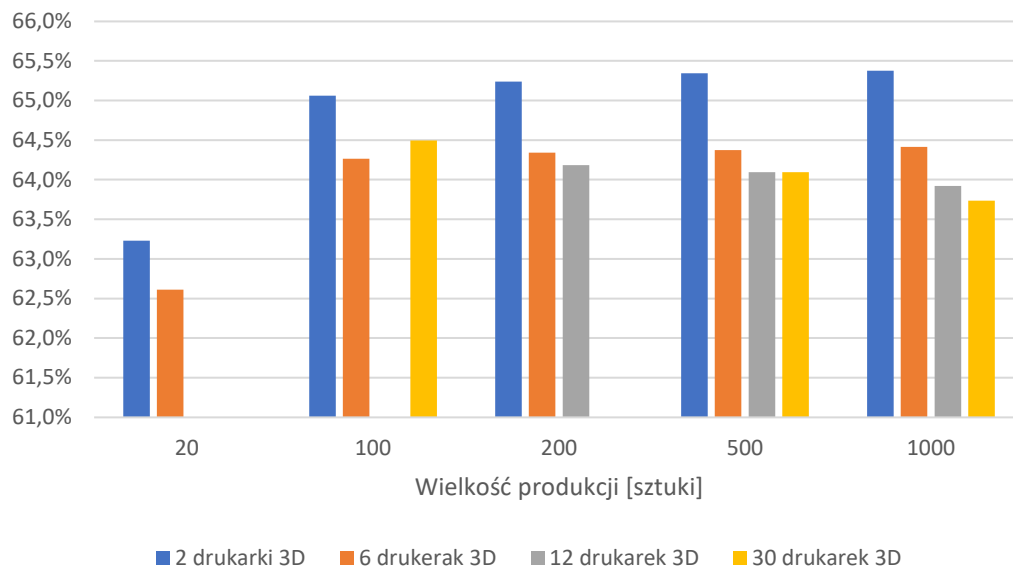
Rys. 5.32. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 30 drukarek

Wykres na rys. 5.33 przedstawia zestawienie redukcji kosztów wytwarzania w zależności od liczby drukarek 3D dla środowisk zautomatyzowanych w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym. W obu przypadkach redukcja kosztów wzrasta wraz ze zwiększeniem ilości drukarek 3D w zespole produkcyjnym. Punkt przecięcia linii na wykresie określa rozmiar struktury drukarek 3D, w której ekonomicznie uzasadnione jest wprowadzenie automatyzacji drugiego stopnia. Dla modelu korpusu przekładni, gdzie czasu wydruku pojedynczego modelu wynosi około 15 godzin, są to struktury zaczynające się od 8 drukarek 3D.

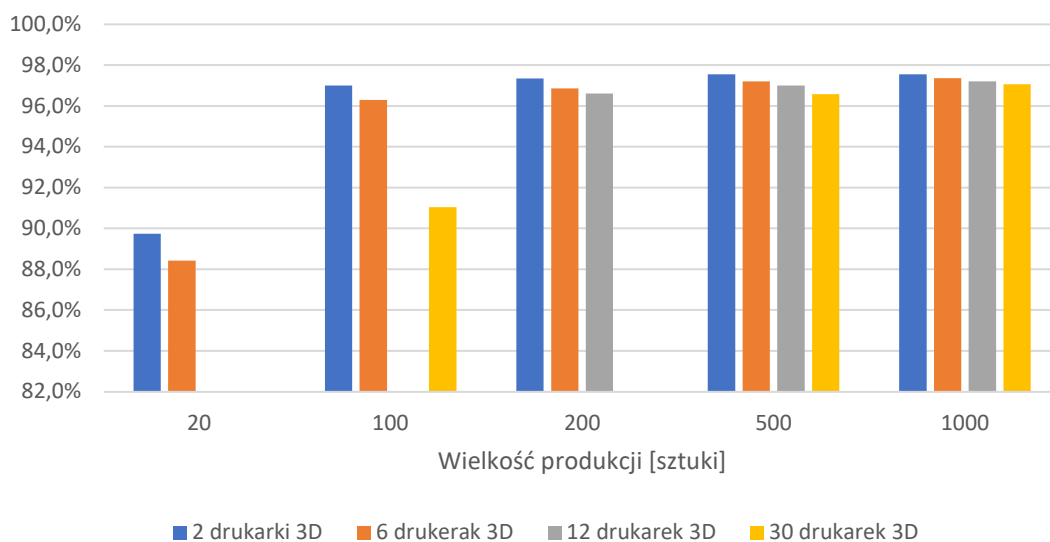


Rys. 5.33. Wykres redukcji kosztów wytwarzania w zależności od liczby drukarek 3D

Redukcja kosztów wytwarzania jest wynikiem zarówno zmniejszenia godzinowego kosztu pracy parku maszynowego jak i redukcji ogólnego czasu pracy operatora. Wykresy na rys. 5.34 i rys. 5.35 przedstawiają stopień redukcji czasu pracy operatora odpowiednio w środowiskach o pierwszym i drugim stopniu automatyzacji w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym. Obliczona wartość redukcji czasu waha się w przedziale od 62,6 do 65,4 % - pierwszy stopień automatyzacji oraz od 88,4 do 97,5 % - drugi stopień automatyzacji.



Rys. 5.34. Redukcja czasu pracy operatora – pierwszy stopień automatyzacji



Rys. 5.35. Redukcja czasu pracy operatora – drugi stopień automatyzacji

5.5.3. Koło zębate KZ-2

Wyniki oraz założone parametry symulacji procesu wytwarzania dla modelu małego koła przedstawione zostały w tab. 5.48 (mały zespół produkcyjny) i tab. 5.49 (średni i duży zespół produkcyjny). Koszt pracy operatora określony został na poziomie 60 zł/godz. W trybie wytwarzania konwencjonalnego do jego zadań należy m.in. dwukrotne wykonanie inspekcji przebiegu procesu w trakcie pojedynczego wydruku oraz dwukrotna weryfikacja ilości filamentu na każdy zużyty kilogram. Ze względu na rozmiary modelu, możliwe było umieszczenie do 20 kół na jednej platformie roboczej. Ilość modeli wytwarzanych w poszczególnych wydrukach dobierana była w sposób umożliwiający pełne wykorzystanie filamentu w szpuli. Wiąże się to z koniecznością wygenerowania większej ilości plików produkcyjnych o zróżnicowanej liczbie elementów na platformie roboczej.

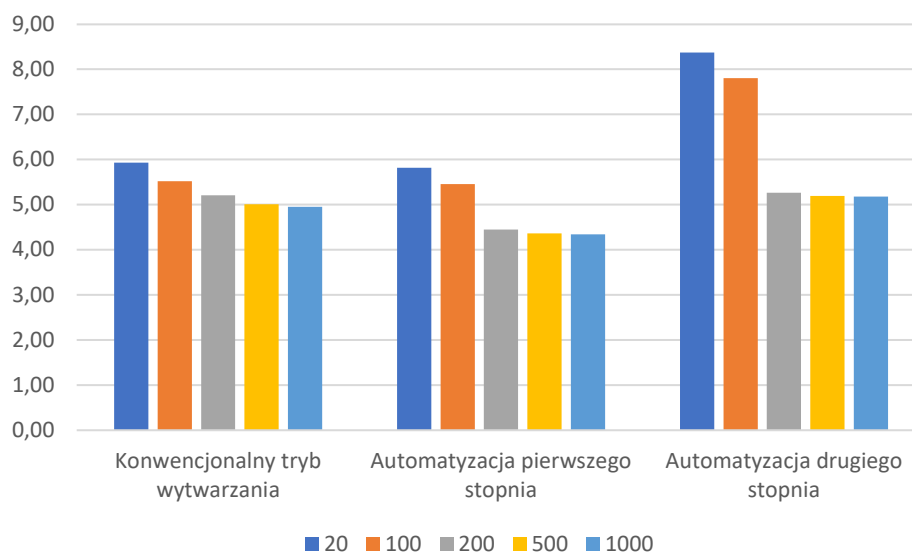
Symulacje dla małego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 20, 100, 200, 500 i 1000 sztuk. W dwóch pierwszych przypadkach wykorzystana została tylko jedna drukarka 3D, natomiast w pozostałych wykorzystane zostały wszystkie dostępne drukarki 3D. Czas pracy parku maszynowego dla poszczególnych partii wynosi odpowiednio: 26,03, 130,20, 130,20, 325,45 i 650,85 godziny.

Tab. 5.48. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla małych zespołów produkcyjnych (2 drukarki 3D)

Lp.		1	2	3	4	5
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	2	2	2	2	2
	Liczba sztuk w partii	20	100	200	500	1000
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	1	1	2	2	2
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60
	Liczba wydruków	1	6	12	27	51
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	1	5	7	14	26
	Liczba różnych plików produkcyjnych	1	3	3	3	4
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2
	Ilość filamentu [kg]	0,23	1,15	2,3	5,75	11,5
	Koszt zakupu filamentu [zł]	45	121	197	463	895
	Liczba szpul filamentu	1	2	3	4	6

Parametry wyjściowe	Największa liczba wymian szpul na drukarce		1	1	2	2	3	
	Czas pracy parku maszynowego [godz]		26,03	130,20	130,20	325,45	650,85	
	Liczba wymian filamentu		1	2	3	4	6	
	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Liczba inspekcji		2	12	24	54	102
		Liczba weryfikacji filamentu		2	5	8	16	29
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska		4	16	22	43	79
		Czas pracy operatora [godz]		0,53	1,97	2,88	5,58	10,17
		Koszt pracy operatora [zł]		32	118	173	335	610
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		3,33	3,33	6,67	6,67	6,67
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]		87	434	868	2 170	4 339
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]		119	552	1 041	2 505	4 949
		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]		5,93	5,52	5,20	5,01	4,95
		I STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów ze stanowiska		2	6	8	15
	Czas pracy operatora [godz]		0,27	0,74	1,06	1,98	3,54	
	Redukcja czasu pracy operatora [%]		49,4%	62,6%	63,3%	64,5%	65,2%	
	Koszt pracy operatora [zł]		16	44	63	119	213	
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		3,85	3,85	6,34	6,34	6,34	
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]		100	502	825	2 063	4 126	
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]		116	546	889	2 182	4 339	
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]		5,82	5,46	4,44	4,36	4,34	
	II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Liczba przejść i powrotów stanowiska		2	2	3	3	4
		Czas pracy operatora [godz]		0,25	0,28	0,39	0,42	0,56
		Redukcja czasu pracy operatora [%]		53,4%	85,9%	86,4%	92,5%	94,5%
		Koszt pracy operatora [zł]		15	17	23	25	34
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]		5,86	5,86	7,90	7,90	7,90
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]		153	763	1 029	2 571	5 142
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]		167	780	1 052	2 597	5 176
Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]		8,37	7,80	5,26	5,19	5,18		

Wykres na rys. 5.36 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła zębatego KZ-2. W analizowanych przypadkach obniżenie kosztów wytwarzania uzyskano jedynie poprzez wprowadzenie automatyzacji pierwszego stopnia. Implementacja drugiego stopnia automatyzacji wiązała się z podniesieniem kosztów wytwarzania w stosunku do zarówno wytwarzania w trybie konwencjonalnym jak i wytwarzania w środowisku o pierwszym stopniu automatyzacji.



Rys. 5.36. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 2 drukarek 3D

Symulacje dla średniego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 100, 200, 500 i 1000 sztuk. Proces wytwarzania 20 sztuk, był tożsamy z przypadkiem wytwarzania w strukturze 2 drukarek 3D. Tylko wytwarzanie partii 500 i 1000 sztuk pozwoliło na pełne wykorzystanie parku maszynowego. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 43,41, 52,09, 108,49 i 216,99 godzin.

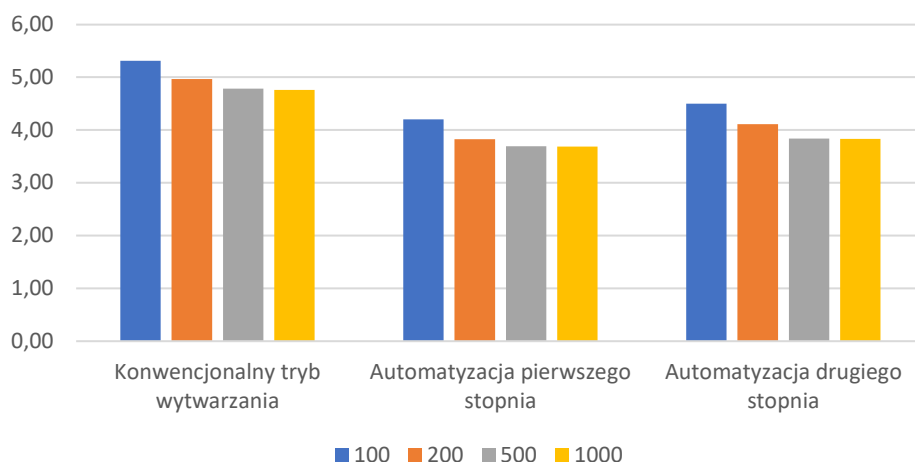
Symulacje dla bardzo dużego zespołu produkcyjnego przeprowadzone zostały dla procesów wytwarzania o wielkościach partii 500 i 1000 sztuk. Plany procesów dla pozostałych wielkości partii były tożsame z planami produkcji w mniejszych zespołach produkcyjnych. Możliwości parku maszynowego zostały obydwóch przypadkach. Łączny czas jego pracy wynosi odpowiednio 54,26 i 108,49 godzin.

Tab. 5.49. Zestawienie zbiorcze wyników symulacji dla średnich i dużych zespołów produkcyjnych (6 i 12drukarek 3D)

Lp.		1	2	3	4	5	6	
Dane wejściowe	Liczba drukarek w zespole produkcyjnym	6	6	6	6	12	12	
	Liczba sztuk w partii	100	200	500	1000	500	1000	
	Liczba wykorzystanych drukarek 3d	3	5	6	6	12	12	
	Koszt pracy operatora [zł / godz]	60	60	60	60	60	60	
	Liczba wydruków	7	14	29	58	34	58	
	Największa liczba wydruków wykonanych przez drukarkę	3	3	5	10	3	5	
	Liczba różnych plików produkcyjnych	3	3	3	3	3	3	
	Liczba weryfikacji filamentu / 1 kg materiału	2	2	2	2	2	2	
	Liczba inspekcji procesu / wydruk	2	2	2	2	2	2	
	Ilość filamentu [kg]	1,15	2,3	5,75	11,5	5,75	11,5	
	Koszt zakupu filamentu [zł]	167	227	453	907	544	907	
	Liczba szpul filamentu	3	3	6	12	12	12	
	Największa liczba wymian szpul na drukarce	1	1	1	2	1	1	
	Parametry wyjściowe	WYTWARZANIE KONWENCJONALNE	Czas pracy parku maszynowego [godz]	43,41	52,09	108,49	216,99	54,26
Liczba wymian filamentu			3	3	6	12	12	12
WYTWARZANIE KONWENCJONALNE		Liczba inspekcji	14	28	58	116	68	116
		Liczba weryfikacji filamentu	6	8	18	35	24	35
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	10	10	16	31	10	16
		Czas pracy operatora [godz]	1,62	2,08	3,71	7,04	4,07	5,99
		Koszt pracy operatora [zł]	97	125	222	422	244	360
		Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	10,00	16,67	20,00	20,00	40,00	40,00
		Koszt pracy parku maszynowego [zł]	434	868	2 170	4 340	2 170	4 340
		Koszt wytworzenia łącznie [zł]	531	993	2 392	4 762	2 415	4 699
I STOPIEŃ AUTOMATYZACJ		Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	5,31	4,96	4,78	4,76	4,83	4,70
		Liczba przejść i powrotów ze stanowiska	4	4	6	11	4	6
		Czas pracy operatora [godz]	0,62	0,77	1,33	2,54	1,45	2,12
		Redukcja czasu pracy operatora [%]	61,8%	63,2%	64,0%	64,0%	64,4%	64,7%
	Koszt pracy operatora [zł]	37	46	80	152	87	127	

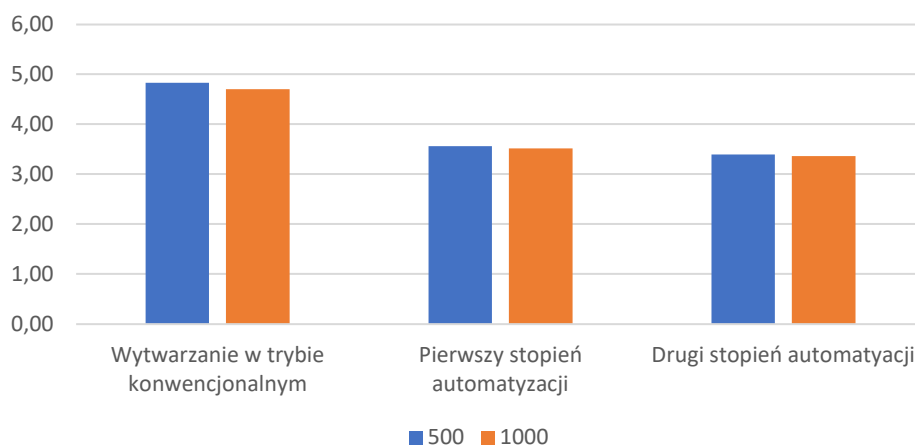
II STOPIEŃ AUTOMATYZACJI	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	8,83	13,80	16,29	16,29	31,22	31,22
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	383	719	1 767	3 535	1 694	3 387
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	420	765	1 848	3 687	1 781	3 514
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	4,20	3,82	3,70	3,69	3,56	3,51
	Liczba przejść i powrotów stanowiska	2	2	2	3	2	2
	Czas pracy operatora [godz]	0,31	0,31	0,40	0,66	0,58	0,58
	Redukcja czasu pracy operatora [%]	81,1%	85,2%	89,3%	90,6%	85,8%	90,4%
	Koszt pracy operatora [zł]	18	18	24	40	35	35
	Koszt pracy parku maszynowego [zł/godz]	9,94	15,44	17,48	17,48	30,63	30,63
	Koszt pracy parku maszynowego [zł]	432	804	1 896	3 792	1 662	3 323
	Koszt wytworzenia łącznie [zł]	450	823	1 920	3 832	1 697	3 358
	Koszt wytworzenia 1 sztuki [zł/szt]	4,50	4,11	3,84	3,83	3,39	3,36

Wykres na rys. 5.37 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła zębatego KZ-2 przy wykorzystaniu zespołu 6 drukarek 3D. Najwyższe koszty (4,76 – 5,31 zł) odnotowane zostały dla produkcji w trybie konwencjonalnym. Najniższe koszty produkcji (3,69 – 4,20) odnotowane zostały podczas wytwarzania w środowiskach o pierwszym stopniu automatyzacji. Produkcja w tym trybie wygenerowała koszty niższe średnio o 1,10 zł w stosunku do produkcji w trybie konwencjonalnym. W analizowanych przypadkach koszty wytwarzania w środowiskach o drugim stopniu automatyzacji są niższe w stosunku do wytwarzania w trybie konwencjonalnym – średnio o 0,88 zł, jednocześnie są wyższe w stosunku do wytwarzania w środowiskach o pierwszym stopniu automatyzacji – średnio o 0,22 zł.



Rys. 5.37. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii – zespół 6 drukarek

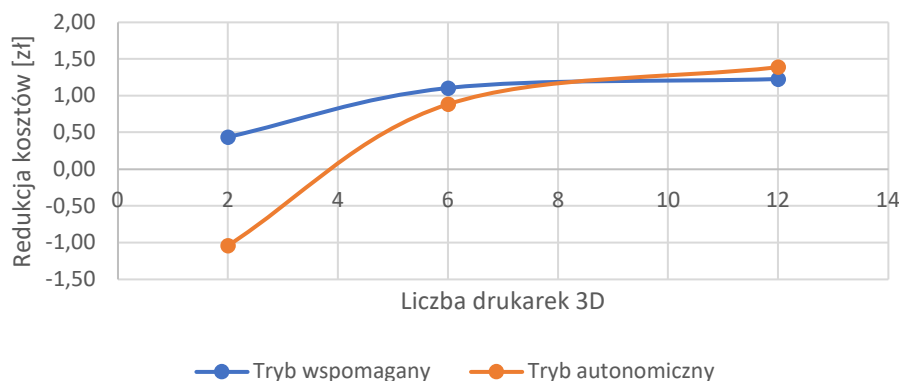
Wykres na rys. 5.38 przedstawia zestawienie oszacowanych kosztów wytworzenia pojedynczego modelu koła zębatego KZ-2 podczas produkcji z wykorzystaniem dużego zespołu drukarek 3D (12 sztuk). W analizowanych przypadkach wprowadzenie automatyzacji umożliwiło redukcję kosztów wytwarzania. W przypadku środowisk o pierwszym stopniu automatyzacji są to wartości niższe średnio o 1,39 zł, natomiast dla środowisk o drugim stopniu automatyzacji niższe średnio o 1,57 zł w stosunku do kosztów wytwarzania w trybie konwencjonalnym.



Rys. 5.38. Porównanie kosztów wytworzenia dla różnych trybów pracy i wielkości elementów w partii - zespół 12 drukarek

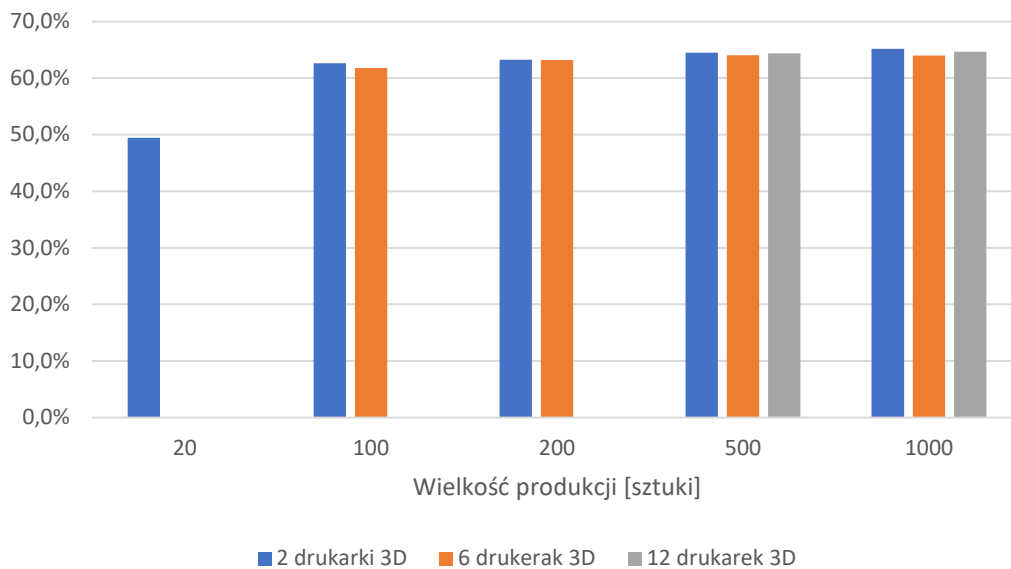
Wykres na rys. 5.39 przedstawia zestawienie redukcji kosztów wytwarzania w zależności od liczby drukarek 3D dla środowisk zautomatyzowanych w stosunku do pracy w trybie konwencjonalnym. Wykres podzielony został na trzy charakterystyczne przedziały. Zauważyć można, że dla struktur mniejszych niż 4 drukarki 3D wprowadzenie robotyzacji

wiąże, się z podniesiem kosztów produkcji. Dla struktur zbudowanych z od 4 do 8 drukarek 3D najbardziej ekonomicznymi są środowiska o pierwszym stopniu automatyzacji. Wprowadzenie drugiego stopnia automatyzacji uzasadnione jest w strukturach większych niż 8 drukarek 3D. Warto zaznaczyć, że dotyczy to przypadków długich wydruków. W analizowanych procesach najczęściej na platformie roboczej umieszczane było 20 kół zębatach a pojedynczy wydruk trwał 26 godzin.

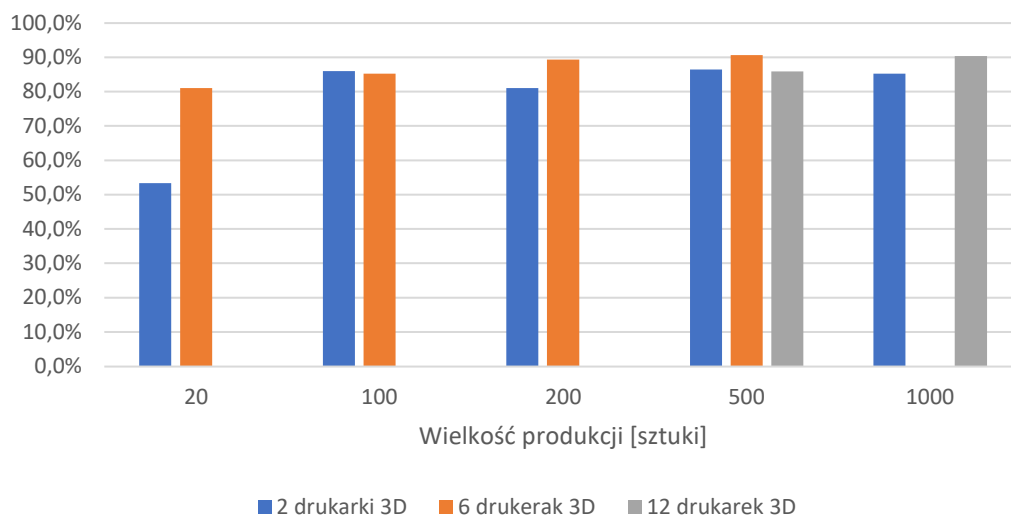


Rys. 5.39. Wykres redukcji kosztów wytwarzania w zależności od liczby drukarek 3D

Redukcja kosztów wytwarzania jest wynikiem zarówno zmniejszenia godzinowego kosztu pracy parku maszynowego jak i redukcji ogólnego czasu pracy operatora. Wykresy na rys. 5.40 i rys. 5.41 przedstawiają stopień redukcji czasu pracy operatora odpowiednio w środowiskach o pierwszym i drugim stopniu automatyzacji w stosunku do konwencjonalnego trybu wytwarzania. Oszacowana wartość redukcji czasu waha się w przedziale od 49,4 do 65,2 % - pierwszy stopień automatyzacji oraz od 53,4 do 90,6 % - drugi stopień automatyzacji.



Rys. 5.40. Redukcja czasu pracy operatora – automatyzacja pierwszego stopnia



Rys. 5.41. Redukcja czasu pracy operatora – automatyzacja drugiego stopnia

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy poruszone zostały zagadnienia związane z tematyką automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego – popularnie zwanego drukiem 3D, który jest niewątpliwie jednym z symboli Czwartej Rewolucji Przemysłowej. Przeprowadzona analiza stanu zagadnienia wykazała, że tematyka ta jest popularna analizowana i badana w ostatnim czasie. W literaturze przedmiotu pojawiają się nowe publikacje naukowe, a producenci urządzeń do druku 3D starają się przystosować swoje produkty do pracy w strukturach nowoczesnych, inteligentnych fabryk. Brakuje jednak rozwiązań pozwalających na kompleksowe ujęcie procesu automatyzacji, informatyzacji i zarządzania produkcją opartą o maszyny przyrostowe.

W wyniku wykonania szeregu analiz i przeprowadzenia wielu doświadczeń opracowana została metodyka integracji systemów i procesów druku 3D z zastosowaniem infrastruktury sieciowej będąca wynikiem realizacji celu pracy. Opracowana metodyka zakłada współpracę sieciową drukarek 3D pozwalając utworzyć heterogeniczne środowiska wytwórcze pracujące w technologii wytłaczania warstwowego. Na jej bazie zostało opracowane i wykonane stanowisko badawcze w postaci zautomatyzowanej stacji druku 3D o budowie modułowej. Stacja obsługiwana jest przez operatora zdalnie poprzez aplikację z poziomu przeglądarki internetowej. Aplikacja zarządza pracą urządzeń do druku oraz pracą robota, którego zadaniem jest transport wytworzonych modeli oraz instalacja czystych platform roboczych. Pozwala to na prowadzenie produkcji w trybie ciągłym do momentu wyczerpania się filamentu.

W wyniku przeprowadzonych prac doświadczalnych wysunąć można następujące wnioski:

- Zastosowanie struktur sieciowych umożliwia zdalną kontrolę procesu wytwarzania, a w szczególności jego uruchomienie, zatrzymanie i transfer plików produkcyjnych. Dzięki temu drukarka lub zespół drukarek 3D mogą zostać uzbrojone wcześniej i czekać w gotowości na zdalne rozpoczęcie procesu na żądanie, w chwili gdy jest to wymagane.
- Transfer plików produkcyjnych drogą sieciową jest mniej czasochłonny w stosunku do konwencjonalnego przenoszenia ich na nośniku pamięci. Ma to szczególne znaczenie w kontekście zarządzania dużymi zespołami maszyn produkcyjnych i przy często zmieniającej się produkcji.
- Wczesna detekcja wad powstających w trakcie wydruku fizycznego obiektu pozwala na redukcję traconego materiału i czasu pracy drukarki 3D. Detekcji tej może dokonać

operator w sposób zdalny poprzez okresową inspekcję obrazu z kamer monitorujących przebieg procesu. Operator może prowadzić obserwację z jednego miejsca co ma szczególne znaczenie w przypadku rozproszonych systemów druku 3D.

- Znajomość typu i ilości dostępnego materiału produkcyjnego w danej drukarce 3D pozwala na efektywne zarządzanie parkiem maszynowym. Dzięki tym informacjom algorytm kolejowania wydruków zaimplementowany w aplikacji nadzorującej całe środowisko wytwórcze może automatycznie przekierować zlecenie wydruku do odpowiedniej drukarki 3D. Ma to szczególne znaczenie w przypadku prowadzenia jednostkowej lub małoseryjnej produkcji na zlecenie oraz w przypadku wystąpienia awarii urządzeń lub detekcji defektu wydruku.
- Automatyczne ewidencjonowanie ilości filamentu w szpulach częściowo zużytych umożliwia wydajniejsze zarządzanie magazynowanymi materiałami. Dzięki znajomości stanów magazynowych możliwe jest zautomatyzowanie pewnych działań związanych z logistyką. Odpowiednie algorytmy mogą ocenić możliwość wykonania danego zlecenia produkcji lub określić ilość materiału potrzebnego do zamówienia. Pozwala to również na szybkie oszacowanie czasu potrzebnego na realizację produkcji co jest niezwykle ważną informacją dla zamawiającego.
- Dodatkowe wprowadzenie zrobotyzowanych systemów wykonawczych pozwala na wyeliminowanie udziału operatora w czynnościach pomiędzy kolejnymi wydrukami. W efekcie jego obecność jest potrzebna jedynie w celu uzbrojenia maszyn w materiał produkcyjny.

W ramach niniejszej pracy wykonane zostały również symulacje przebiegu wielu procesów wytwarzania przyrostowego różniących się ilością maszyn w zespole produkcyjnym, wielkością partii oraz wytwarzanymi elementami. Symulacje prowadzone były w oparciu o konwencjonalny tryb pracy środowiska wytwórczego bez znamion automatyzacji oraz dwa tryby zautomatyzowane w oparciu o opracowaną metodykę. Wyniki symulacji pozwoliły na potwierdzenie założonej tezy. Integracja drukarek 3D, systemów numerycznych, systemów monitoringu i zrobotyzowanych urządzeń wykonawczych z zastosowaniem infrastruktury sieciowej umożliwia automatyzację wytwarzania przyrostowego, szczególnie w zakresie operacji przed i poprocesowych co z kolei umożliwia skrócenie czasu pracy operatora i zmniejszenie kosztów wytwarzania produktów. Wprowadzenie pierwszego stopnia automatyzacji obejmującego integrację siecią drukarek 3D, wdrożenie mechanizmów zdalnej kontroli i automatycznego pomiaru materiału produkcyjnego oraz algorytmów detekcji defektów wydruku umożliwiło redukcję czasu pracy

operatora średnio o 63% we wszystkich analizowanych przypadkach w stosunku do konwencjonalnego trybu wytwarzania. Natomiast wprowadzenie drugiego stopnia automatyzacji poprzez integrację robota obsługującego proces wymiany platform roboczych zredukowało czas pracy operatora średnio o 92%. Przeprowadzone symulacje pozwoliły również na określenie obszarów zastosowania adekwatnego stopnia automatyzacji w kontekście kosztów wytwarzania. Z otrzymanych wyników wnioskować można, że wprowadzenie pierwszego stopnia automatyzacji redukuje koszty wytwarzania we wszystkich analizowanych przypadkach. Ekonomiczne uzasadnienia wdrożenia robotyzacji zależne jest natomiast od ilości drukarek 3D w zintegrowanym środowisku wytwórczym oraz czasu wytwarzania fizycznego obiektu. Najbardziej opłacalne jest wdrożenie drugiego stopnia automatyzacji w dużych zespołach drukarek 3D i do realizacji krótkich wydruków.

Przeprowadzone prace analityczne jak również opracowanie koncepcji zautomatyzowanego, modułowego środowiska wytwórczego opartego o technologię wytwarzania przyrostowego niewątpliwie wnosi nowy wkład do dyscypliny naukowej jaką jest inżynieria mechaniczna. Implementacja opracowanych rozwiązań w zakładach produkcyjnych pozwala na prowadzenie elastycznej i autonomicznej produkcji. Uzbrojone maszyny mogą czekać w gotowości na zdalną inicjację procesu przez operatora z dowolnego miejsca. Jest to istotne w kontekście prowadzenia niskoseryjnej produkcji zleconej spersonalizowanych wyrobów.

Opracowana metodyka doskonale wpisuje się w ramy idei Przemysłu 5.0 czyli wspomagania pracy człowieka poprzez zastosowanie robotów współpracujących oraz algorytmów sztucznej inteligencji. Jej opracowanie nie wyczerpuje jednak zagadnień związanych z automatyzacją procesu wytwarzania przyrostowego. Kierunkami dalszych badań i rozwoju może być opracowanie metod automatycznego załadunku materiału produkcyjnego. Pozwoliłoby to na zdalną wymianę materiału adekwatnie do potrzeb danego zlecenia. Warto również badać metody zdalnej kontroli robotów pod kątem zastosowania ich do realizacji zadań serwisowych.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Bourell, J. P. Kruth i M. Leu, „Materials for additive manufacturing,” *CIRP Annals*, tom 66, pp. 659-681, 2017.
- [2] Y. Lakhdar, C. Tuck, J. Binner, A. Terry i R. Goodridge, „Additive manufacturing of advanced ceramic materials,” *Progress in Materials Science*, tom 116, nr 100736, 2021.
- [3] F. P. Bos, C. Menna i M. Pradena, „The realities of additively manufactured concrete structures in practice,” *Cement and Concrete Research*, tom 156, nr 106746, 2022.
- [4] C. Xin, Z. Li, L. Hao i Y. Li, „A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook,” *Materials & Design*, tom 227, nr 111736, 2023.
- [5] S. Jindal, F. Manzoor, N. Haslam i E. Mancuso, „3D printed composite materials for craniofacial implants: current concepts, challenges and future directions,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tom 112, p. 635–653, 2021.
- [6] Z. Nie, J. Sangjin, K. Levent i K. Whitefoot, „Optimization of Part Consolidation for Minimum Production Costs and Time Using Additive Manufacturing,” *Journal of Mechanical Design*, tom 142, pp. 1-16, 2019.
- [7] G. Prashar, H. Vasudev i D. Bhuddhi, „Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2022.
- [8] G. Budzik, M. Wieczorowski, M. Oleksy, Ł. Przesłowski, A. Paszkiewicz, B. Sobolewski, J. Woźniak i R. Oliwa, „The Place of 3D Printing in the Manufacturing and Operational Process Based on the Industry 4.0 Structure,” *Tehnički glasnik*, tom 16, nr 2, pp. 252-257, 2022.
- [9] G. Budzik, J. Woźniak i Ł. Przesłowski, *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2022.

- [10] A. Zocca, J. Wilbig i A. Waske, „Challenges in the Technology Development for Additive Manufacturing in Space,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, tom 1, nr 100018,, 2022.
- [11] T. Waddell, J. Toombs i A. Reilly, „Use of volumetric additive manufacturing as an in-space manufacturing technology,” *Acta Astronautica*, tom 211, pp. 474-482, 2023.
- [12] A. Adel, „Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas,” *Journal of Cloud Computing*, tom 11, nr 40, 2022.
- [13] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen i D. Hui, „Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, tom 143, pp. 172-196, 2018.
- [14] A. Kampkera, J. Triebsa, S. Kawolleka, P. Ayvaza i S. Hohenstein, „Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems,” w *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Ljubljana, 2019.
- [15] C. Wu, C. Dai, G. Fang, Y.-J. Liu i C. C. Wang, „RoboFDM: A Robotic System for Support-Free Fabrication using FDM,” w *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, 2017.
- [16] P. M. Bhatt, R. K. Malhan i S. K. Gupta, „Computational Foundations for Using Three Degrees of Freedom Build Platforms to Enable Supportless Extrusion-Based Additive Manufacturing,” w *ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Pennsylvania, 2019.
- [17] S. Hongyao , P. Lingnan i Q. Jun, „Research on large-scale additive manufacturing based on multi-robot,” *Additive Manufacturing*, tom 30, 2019.
- [18] X. Zhang, M. Li, J. H. Lim, Y. W. Tay, H. Pham i Q.-C. Pham, „Large-scale 3D printing by a team of mobile robots,” *Automation in Construction*, tom 95, pp. 98-106, 2018.
- [19] K. Zhang, P. Chermprayong, D. Tzoumanikas i et al., „Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots,” *Nature*, tom 609, pp. 709-717, 2022.

- [20] P. Becker, E. Henger, A. Roennau i R. Dillmann, „Flexible Object Handling in Additive Manufacturing with Service Robotics,” w *IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, Tokio, 2019.
- [21] P. Becker, A. Maklashevskikh, A. Roennau i R. Dillmann, „Multiple Object Detection and Segmentation for Automated Removal in Additive Manufacturing with Service Robots,” w *International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS)*, Singapur, 2021.
- [22] M. Glatt, S. Greco, L. Yi, B. Kirsch i J. C. Aurich, „Development and implementation of a system for the automated removal of parts produced by Fused Deposition Modeling,” *Procedia CIRP*, tom 103, pp. 109-114, 2021.
- [23] K. Ozsoy, B. Aksoy i M. Yucel, „Design And Manufacture Of Continuous Automatic 3D Printing Device With Conveyor System By Image Processing Technology,” *Erzincan University Journal of Science and Technology*, tom 13, pp. 392-403, 2020.
- [24] A. P., „Blackbelt, the first 3D printer using a conveyer belt,” 3Dnatives, 12 5 2017. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/blackbelt-autodesk-3d-printer120520174/>. [Data uzyskania dostępu: 20 12 2022].
- [25] C. W. Hull, „Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography”. Patent US4575330,, 11 Marzec 1986.
- [26] www.formlabs.com. [Online].
- [27] H. J. Kamps, „Formlabs inches toward mass manufacturing with high-volume 3D printing solutions,” TechCrunch, 4 1 2023. [Online]. Available: <https://techcrunch.com/2023/01/04/formlabs-automation-ecosystem/>. [Data uzyskania dostępu: 1 12 2023].
- [28] H. Nguyen, N. Adrian, J. L. Yan, J. M. Salfity, W. Allen i Q.-C. Pham, „Development of a Robotic System for Automated Decaking of 3D-Printed Parts,” w *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paryż, 2020.
- [29] A. Osborne, „Solukon’s SPR-Pathfinder Software for Automatic Depowdering,” 11 9 2022. [Online]. Available:

<https://www.additivemanufacturing.media/products/solukons-spr-pathfinder-software-for-automatic-depowdering>. [Data uzyskania dostępu: 6 10 2022].

- [30] A. Osborne, „PostProcess, EOS Create Partnership for Automated Depowdering,” 11 11 2022. [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/news/postprocess-eos-create-partnership-for-automated-depowdering>. [Data uzyskania dostępu: 23 12 2022].
- [31] D.-G. Ahn, „Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, nr 8, pp. 703-742, 2021.
- [32] D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng i inni, „Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications,” *Materialstoday*, tom 49, nr 10, pp. 271-295, 2021.
- [33] O. Gulcan, K. Günaydın i A. Tamer, „The State of the Art of Material Jetting - A Critical Review,” *Polymers*, tom 13, nr 16, 2021.
- [34] M. Ziaee i N. B. Crane, „Binder jetting: A review of process, materials, and methods,” *Additive Manufacturing*, tom 28, pp. 781-801, 2019.
- [35] L. Griffiths, „Digital Metal unveils automation concept for metal 3D printing,” 16 10 2018. [Online]. Available: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/digital-metal-automated-concept-metal-3d-printing/>. [Data uzyskania dostępu: 23 1 2023].
- [36] S. Saunders, „Digital Metal Announces Automated Depowdering for Metal Binder Jet 3D Printing,” 22 7 2021. [Online]. Available: <https://3dprint.com/283462/digital-metal-announces-automated-depowdering-for-metal-binder-jet-3d-printing/>. [Data uzyskania dostępu: 23 1 2023].
- [37] T. D. Ngo, A. Kashani, K. Nguyen, G. Imbalzano i D. Hui, „Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods,” *Composites Part B*, tom 143, pp. 172-196, 2018.
- [38] P. M. Bhatt, A. M. Kabir, M. Peralta, H. A. Bruck i S. K. Gupta, „A robotic cell for

- performing sheet lamination-based additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, tom 27, pp. 278-289, 2019.
- [39] R. Jones, P. Haufe, E. Sells, I. Pejman, V. Olliver, C. Palmer i A. Bowyer, „RepRap - the replicating rapid prototyper.,” *Robotica*, nr 29, pp. 177-191, 2011.
- [40] J. Pearce, „Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware.,” *Science*, tom 337, pp. 1303-4, 2012.
- [41] L. Romero, A. C. Guerrero, M. L. Jiménez, I. M. Domínguez, M. Espinosa i M. Domínguez, „Additive manufacturing with RepRap methodology : current situation and future prospects,” w *25TH ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM*, Austin, Texas, 2014.
- [42] J. Villalba-Diez i J. Ordieres-Meré , „Human–Machine Integration in Processes within Industry 4.0 Management,” *Sensors*, tom 21(17), nr 5928, 2021.
- [43] L. Chao, X. Xun, P. Qijia i Z. Zhengyi, „MTConnect-based Cyber-Physical Machine Tool: a case study,” *Procedia CIRP*, tom 72, p. 492–497, 2018.
- [44] B. Edrington, B. Zhao i A. Hansel, „Machine monitoring system based on MTConnect technology,” *Procedia CIRP*, tom 22, p. 92 – 97, 2014 .
- [45] S. P. Muniraj i X. Xun, „An Implementation of OPC UA for Machine-to-Machine Communications in a Smart Factory,” *Procedia Manufacturing*, tom 53, pp. 52-58, 2021.
- [46] F. Paukera, T. Fruhwirthb, K. Burkhard i W. Kastnerb, „A systematic approach to OPC UA information model design,” *Procedia CIRP*, tom 57, p. 321 – 326, 2016.
- [47] M. Kashyap, V. Sharma i N. Gupta, „Taking MQTT and NodeMcu to IOT: Communication in Internet of Things,” *Procedia Computer Science*, tom 132, p. 1611–1618, 2018.
- [48] D. Dinculeana i X. Cheng, „Vulnerabilities and Limitations of MQTT Protocol Used between IoT Devices,” *Applied Sciences*, tom 9, nr 848, 2019.
- [49] J.-P. Rudolph i C. Emmelmann, „A Cloud-based Platform for Automated Order

Processing in Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, tom 63, pp. 412-417, 2017.

- [50] L. Zhang, X. Luo, L. Ren, J. Mai, F. Pan, Z. Zhao i B. Li, „Cloud based 3D printing service platform for personalized manufacturing,” *Science China Information Sciences*, tom 63, nr 124201, 2020.
- [51] X. Luo, L. Zhang, L. Ren i Y. Lali, „A dynamic and static data based matching method for cloud 3D printing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, tom 61, nr 101858, 2020.
- [52] J. Cui, L. Ren, J. Mai, P. Zheng i L. Zhang, „3D Printing in the Context of Cloud Manufacturing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, tom 74, nr 102256, 2022.
- [53] J. Weinman, „The Economics of Pay-per-Use Pricing,” *IEEE Cloud Computing*, nr 5, pp. 101-109, 2018.
- [54] C. Liu, Z. Su, X. Xu i Y. Lu, „Service-oriented industrial internet of things gateway for cloud manufacturing,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, tom 73, nr 102217, 2022.
- [55] J. Ariza i H. Baez, „Understanding the role of single-board computers in engineering and computer science education: A systematic literature review,” *Computer Applications in Engineering Education*, tom 30, pp. 304-329, 2022.
- [56] S. Johnston i S. Cox, „The Raspberry Pi: A Technology Disrupter, and the Enabler of Dreams,” *Electronics*, tom 6, nr 57, 2017.
- [57] P. Visconti, G. Giannotta i R. Brama, „Features, operation principle and limits of spi and I2C communication protocols for smart objects: A novel spi-based hybrid protocol especially suitable for IoT applications,” *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, tom 10, nr 2, pp. 262-295, 2017.
- [58] J. Vivek i G. R. Kanagachidambaresan, „Intelligent Single-Board Computer for Industry 4.0: Efficient Real-Time Monitoring System for Anomaly Detection in CNC Machines,” *Microprocessors and Microsystems*, tom 93, nr 104629, 2022.

- [59] R. Boateng, J. Ofoeda i J. Effah, „Application Programming Interface (API) Research: A Review of the Past to Inform the Future,” *International Journal of Enterprise Information Systems*, tom 15, nr 3, pp. 76-95, 2019.
- [60] G. Budzik, M. Przytuła, A. Paszkiewicz, P. Poliński i M. Kielbicki, „Analiza rozwiązań zdalnych aplikacji sterowania i monitoringu procesu druku 3D,” *Przegląd Mechaniczny*, nr 3, pp. 36-39, 2021.
- [61] S. Nuchitprasitchai, M. Roggemann i J. Pearce, „Three Hundred and Sixty Degree Real-Time Monitoring of 3-D Printing Using Computer Analysis of Two Camera Views,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, tom 1, nr 2, 2017.
- [62] K. Hyungjung, J. Woo-Kyun, C. In-Gyu i A. Sung-Hoon, „A Low-Cost Vision-Based Monitoring of Computer Numerical Control (CNC) Machine Tools for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs),” *Sensors*, tom 19, nr 4506, 2019.
- [63] X. Wu, Z. Yu i Y. Wang, „Real-time FDM machine condition monitoring and diagnosis based on acoustic emission and hidden semi-Markov model,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tom 90, pp. 2027-2036, 2017.
- [64] P. Becker, C. Roth, A. Roennau i R. Dillman, „Acoustic Anomaly Detection in Additive Manufacturing with Long Short-Term Memory Neural Networks,” w *IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, Bangkok, 2020.
- [65] S. Nuchitprasitchai, M. Roggemann i J. Pearce, „Factors effecting real-time optical monitoring of fused filament 3D printing,” *Progress in Additive Manufacturing*, tom 2, pp. 133-149, 2017.
- [66] U. Delli i S. Chang, „Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning,” *Procedia Manufacturing*, Tomy 1 z 2865-870, p. 26, 2018.
- [67] X. Bampoula, G. Siaterlis, N. Nikolakis i K. Alexopoulos, „A Deep Learning Model for Predictive Maintenance in Cyber-Physical Production Systems Using LSTM Autoencoders,” *Sensors*, tom 21, nr 972, 2021.
- [68] D. Bruneo i F. De Vita, „On the Use of LSTM Networks for Predictive Maintenance in

Smart Industries,” w *IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, Washington, DC, USA, 2019.

- [69] S. Kakade, A. Mulay i S. Patil, „IoT-based real-time online monitoring system for open ware FDM printers,” *Materials Today: Proceedings*, tom 67(2), pp. 363-367, 2022.
- [70] G. F. Barbosa i R. Aroca, „An IoT-Based Solution for Control and Monitoring of Additive Manufacturing Processes,” *Journal of Powder Metallurgy and Mining*, tom 6(1), nr 1000158, 2017.
- [71] J. O'Connell, „All3DP.com,” 7 październik 2020. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/spaghetti-detective-octoprint-guide/>. [Data uzyskania dostępu: 2023 kwiecień 5].
- [72] J. O'Connell, „Printings Atom,” 12 styczeń 2023. [Online]. Available: <https://printingatoms.com/how-to-setup-obico/>. [Data uzyskania dostępu: 2023 kwiecień 6].
- [73] B. Saltiel, „Detect Print Failures with This Free Plug-in,” All3DP, 28 sierpień 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/4/detect-print-failures-with-this-free-plug-in/>. [Data uzyskania dostępu: 2023 kwiecień 7].
- [74] L. Lind, „PrintWatch (OctoPrint Plug-in): All You Need to Know,” All3DP, 13 kwiecień 2022. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/printwatch-simply-explained/>. [Data uzyskania dostępu: 2023 kwiecień 7].
- [75] M. Koten, „Prusa Research: A Global Player on the 3D Printer Market,” 11 7 2022. [Online]. Available: <https://3seaseurope.com/prusa-research-3d-printer/>. [Data uzyskania dostępu: 2022 11 27].
- [76] „www.prusa3d.com,” [Online].
- [77] K. Sertoglu, „Prusa Showcases Its New Modular 3d Printer Farm At Dubai's Expo 2020,” 3D Printing Industry, 4 10 2021. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/prusa-showcases-its-new-modular-3d-printer-farm-at-dubais-expo-2020-197091/>. [Data uzyskania dostępu: 28 11 2022].

- [78] 3D Printing Media Network, „Stratasys Demonstrates Multi-cell AM Platform for Continuous Production,” 9 5 2017. [Online]. Available: <https://www.3dprintingmedia.network/stratasys-demonstrates-multi-cell-platform-continuous-production/>. [Data uzyskania dostępu: 12 12 2022].
- [79] „www.stratasys.com,” [Online].
- [80] 3D Systems, „Figure 4 Production,” [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/figure-4-production>. [Data uzyskania dostępu: 6 1 2023].
- [81] „www.3dsystems.com,” [Online].
- [82] Additive Manufacturing, „3DQue Multi-Failure Detection System for 3D Printing,” 6 10 2022. [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/news/3dque-multi-failure-detection-system-for-3d-printing>. [Data uzyskania dostępu: 13 12 2022].
- [83] „www.3dque.com,” [Online].
- [84] O. Johnson, „3DQue puts additive manufacturing on autopilot with AutoPrint3D,” TCT Magazine, 22 7 2022. [Online]. Available: [3DQue puts additive manufacturing on autopilot with AutoPrint3D](#). [Data uzyskania dostępu: 13 12 2022].
- [85] P. Zielinski, „Why Additive’s Automation Is Autonomous,” *Additive Manufacturing*, tom 11, nr 5, pp. 34-35, 2022.
- [86] „www.media.ford.com,” [Online].
- [87] „www.evcoplastics.com,” [Online].
- [88] S. Hendrixson, „Automated 3D Printing: Composites, Cobots, Email and More,” *Additive Manufacturing*, tom 8, nr 4, pp. 32-34, 2019.
- [89] „www.ptonline.com,” [Online].
- [90] S. Hendrixon, „Voodoo Mfg. Microfactory Takes Desktop 3D Printers into Volume Production,” *Additive Manufacturing*, 20 10 2017. [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/voodoo-mfg-microfactory-takes->

desktop-3d-printers-into-volume-production. [Data uzyskania dostępu: 5 1 2023].

- [91] S. Saunders, „Voodoo Manufacturing Announces the Launch of New Print API and Partner Program,” 3DPrint, 27 2 2017. [Online]. Available: <https://3dprint.com/165766/voodoo-print-api-partner-program/>. [Data uzyskania dostępu: 5 1 2023].
- [92] C. Scott, „Voodoo Manufacturing Tells Us About Automating 3D Printing With Project Skywalker,” 3DPrint, 15 3 2017. [Online]. Available: <https://3dprint.com/167938/project-skywalker-voodoo/>. [Data uzyskania dostępu: 5 1 2023].
- [93] Form Labs, „Form Cell,” [Online]. Available: <https://formlabs.com/3d-printers/form-cell/>. [Data uzyskania dostępu: 4 1 2023].
- [94] „www.mosaicmfg.com,” [Online].
- [95] J. Hider, „Farm in a Box,” *Additive Manufacturing*, tom 11, nr 5, pp. 36-37, 2022.
- [96] Mosaic Manufatcturing, „Array Production,” [Online]. Available: <https://www.mosaicmfg.com/products/array-production>. [Data uzyskania dostępu: 16 1 2023].
- [97] A. Paszkiewicz, G. Budzik, M. Bolanowski, J. Woźniak, M. Przytuła, M. Kiełbicki, P. Poliński i Ł. Kochmański, „Incremental processing of polymer materials using the INDSUTRY 4.0 network structure,” *POLIMERY*, tom 66, nr 7-8, pp. 418-425, 2021.
- [98] P. Siemiński i G. Budzik, *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D.*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2015.
- [99] S. Das, A. Karmakar, P. Das i B. Koley, „Manufacture of Electronic Weighing Machine Using Load Cell,” *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, tom 14, pp. 32-37, 2019.
- [100] V. Kamble, V. Shinde i J. Kittur, „Overview of Load Cells,” *Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*, tom 6, pp. 22-29, 2020.
- [101] W. C. Tan i M. S. Sidhu, „Review of RFID and IoT integration in supply chain

- management,” *Operations Research Perspectives*, tom 9, nr 100229, 2022.
- [102] C. Herrojo, F. Paredes, J. Mata-Contre i M. Ferran, „Chipless-RFID: A Review and Recent Developments,” *Sensors*, tom 19(15), nr 3385, 2019.
- [103] G. Casella, B. Bigliardi i E. Bottani, „The evolution of RFID technology in the logistics field: a review,” *Procedia Computer Science*, tom 200, pp. 1582-1592, 2022.
- [104] G. Budzik i Ł. Przeszłowski, „Kontrola procesu wytwarzania przyrostowego oparta na systemach zdalnie sterowanych,” *Przegląd Mechaniczny*, nr 1, pp. 28-31, 2021.
- [105] L. Birglen i T. Schlicht, „A statistical review of industrial robotic grippers,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, tom 49, pp. 88-97, 2018.
- [106] G. Fantoni, M. Santochi i G. Dini, „Grasping devices and methods in automated production processes,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, tom 63, pp. 679-701, 2014.
- [107] M. Ghobakhloo , „Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability,” *Journal of Cleaner Production*, tom 252, nr 119869, 2019.
- [108] K. Zhou, T. Liu i L. Zhou, „Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges,” w *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Zhangjiajie, 2015.
- [109] A. Sharma, E. Kosasih, J. Zhang, A. Brintrup i A. Calinescu, „Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions,” *Journal of Industrial Information Integration*, tom 30, nr 100383, 2022.
- [110] M. Attaran i G. B. Celik, „Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities,” *Decision Analytics Journal*, tom 6, nr 100165, 2023.
- [111] Q. Li, Y. Yang i P. Jiang, „Remote Monitoring and Maintenance for Equipment and Production Lines on Industrial Internet: A Literature Review,” *Machines*, tom 11, nr 12, 2023.
- [112] G. Budzik, J. Woźniak, A. Paszkiewicz, Ł. Przeszowski, T. Dziubek i M. Dębski, „Methodology for the Quality Control Process of Additive Manufacturing Products

Made of Polymer Materials,” *Materials*, tom 14, nr 2022, 2021.

- [113] J. Woźniak, G. Budzik, Ł. Przeszlowski, P. Fudali, T. Dziubek i A. Paszkiewicz, „Analysis of the quality of products manufactured with the application of additive manufacturing technologies with the possibility of applying the Industry 4.0 conception,” *International Journal for Quality Research*, tom 16(3), pp. 831-850, 2022.
- [114] A. Souza, „Metrological evaluation of a Coordinate Measuring Machine with 5-axis measurement technology,” *Procedia CIRP*, tom 75, p. 367–372, 2018.
- [115] A. Haleem, M. Javaid i R. P. Singh, „Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview,” *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, tom 3, p. 161–171, 2022.
- [116] T. Dziubek i M. Oleksy, „Zastosowanie systemu optycznego ATOS II w technikach szybkiego prototypowania modeli kół zębatych otrzymywanych na bazie żywicy epoksydowej,” *Polimery*, tom 62, nr 1, pp. 44-52, 2017.
- [117] J. Molina-Ríos i N. Pedreira-Souto, „Comparison of development methodologies in web applications,” *Information and Software Technology*, tom 119, nr 106238, 2020.
- [118] M. Laaziri, K. Benmoussa i S. Khouliji, „Analyzing bootstrap and foundation front-end frameworks: a comparative study,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, tom 9, pp. 713-722, 2019.
- [119] V. de Oliveira, F. Junqueira, P. Miyagi i M. Pessoa, „SQL and NoSQL Databases in the Context of Industry 4.0,” *Machines*, tom 10, nr 20, 2021.
- [120] W. Danilczuk, R. Cechowicz i A. Gola, „Analiza konfiguracji linii produkcyjnych na podstawie modeli symulacyjnych,” *Informatyczne Systemy Zarządzania*, nr 5, pp. 25-42, 2014.
- [121] S. Kłós i J. Patalas-Maliszewska, „Symulacja przebiegu procesów produkcyjnych w systemach przepływowych w oparciu o oprogramowanie tecnomatix plant simulation,” w *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Opole, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2016, pp. 780-790.

- [122] K. Janisz, A. Mikulec i K. Górka, „Symulacja procesu technologicznego w aspekcie jego logistyki i wydajności,” *Autobusy*, nr 6, pp. 1394-1399, 2017.
- [123] E. Magrini, F. Ferraguti, A. J. Ronga, F. Pini, A. Luca i F. Leali, „Human-robot coexistence and interaction in open industrial cells,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, tom 61, nr 101846, 2020.
- [124] E. Matheson, R. Minto , E. Zampieri, M. Faccio i G. Rosati, „Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review,” *Robotics*, tom 8(4), nr 100, 2019.
- [125] P. Bilancia, J. Schmidt, R. Raffaelli, M. Peruzzini i M. Pellicciari, „An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches,” *Applied Sciences*, tom 13, nr 2582, 2023.
- [126] J. Pisula, G. Budzik, P. Turek i M. Cieplak, „An Analysis of Polymer Gear Wear in a Spur Gear Train Made Using FDM and FFF Methods Based on Tooth Surface Topography Assessment,” *Polymers*, tom 13, nr 1649, 2021.
- [127] A. Z. Hameed, S. A. Raj i K. Jayakrishna, „3D Printing Parameter Optimization Using Taguchi Approach to Examine Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Mechanical Properties,” *Polymers*, tom 14, nr 3256., 2022.

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł: Metodyka automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego MEX z zastosowaniem infrastruktury sieciowej

Autor: mgr inż. Mateusz Przytuła

Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

Promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej Paszkiewicz

Tematyka pracy związana jest z zagadnieniem automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego metodą MEX z wykorzystaniem infrastruktury sieciowej. Głównym celem pracy jest analiza procesu wytwarzania przyrostowego pozwalająca na opracowanie rozwiązań z zakresu automatyzacji produkcji i zarządzania procesem wytwórczym z wykorzystaniem struktur sieciowych w wyniku której została opracowana metodyka automatyzacji i informatyzacji procesu druku 3D opartego o wyłaczanie warstwowe.

Przeprowadzona w pierwszej części pracy analiza stanu zagadnienia wykazała różnorodność podejścia do automatyzacji, która w zależności od rozwiązania obejmuje jedynie wybrane elementy procesu przyrostowego nie podejmując kompleksowego ujęcia procesu automatyzacji, informatyzacji i zarządzania produkcją opartą o maszyny przyrostowe.

Druga część pracy poświęcona została opracowaniu metodyki automatyzacji procesu wytwarzania przyrostowego szczególnie w zakresie operacji przed i poprocesowych. Przeanalizowane zostały metody integracji sieciowej drukarek 3D, układy zdalnej kontroli i monitorowania procesu wytwarzania, mechanizmy kontroli ilości dostępnego materiału produkcyjnego oraz metody przenoszenia wytworzonych modeli przy pomocy robota współpracującego. Na podstawie opracowanej metodyki zbudowane zostało stanowisko badawcze w formie zautomatyzowanej stacji druku 3D z aplikacją nadzorującą.

Część badawcza obejmuje analizę, w wyniku której uzasadnione zostało wdrożenie opracowanej metodyki automatyzacji. Wyniki badań wykazały znaczną redukcję czasu pracy operatora i kosztów wytwarzania.

Słowa kluczowe: druk 3D, wytwarzanie przyrostowe, automatyzacja, integracja sieciowa drukarek 3D, przemysł 4.0.

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Title: MEX additive manufacturing automation process methodology using network infrastructure

Author: mgr inż. Mateusz Przytuła

Supervisor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

Auxiliary supervisor: dr inż. Andrzej Paszkiewicz

The subject of this dissertation is focused on the automation of the incremental manufacturing process using the MEX method with the utilization of network infrastructure. The main goal of the research is to analyze the incremental manufacturing process in order to develop solutions for production automation and process management using network structures. As a result of this analysis, a methodology for the automation and informatization of the 3D printing process based on material extrusion was developed.

The initial part of the work involved an analysis of the current state of the art, which revealed a diversity of approaches to automation, with some solutions focusing only on specific elements of the incremental process without include a comprehensive automation, informatization, and production management approach for additive manufacturing machines.

The second part of the work was dedicated to developing a methodology for the automation of the incremental manufacturing process, particularly concerning pre-processing and post-processing operations. This involved the analysis of network integration methods for 3D printers, remote control and monitoring mechanisms for the manufacturing process, material availability control, and methods for transferring the produced models using collaborative robots. Based on this methodology, a research station was built in the form of an automated 3D printing station with web based supervisory application.

The research component of the work includes an analysis that justifies the implementation of the developed automation methodology. The results of the study showed a significant reduction in operator work time and manufacturing costs.

Key words: 3D print, additive manufacturing, automation, 3D printers network connectivity, industry 4.0