



**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ**  
**INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ**  
**ZAKŁAD PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII**

**SYSTEM ADAPTACYJNEGO STEROWANIA  
WYBRANYM PROCESEM PRODUKCJI  
Z ZASTOSOWANIEM TECHNOLOGII  
CYFROWYCH W ŚREDNIEJ WIELKOŚCI  
PRZEDSIĘBIORSTWIE METALOWYM**

mgr inż. Artur Meller

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c., Politechnika Poznańska  
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Suszyński, Politechnika Poznańska

POZNAŃ 2024

Panu Profesorowi Stanisławowi Legutko, składam serdeczne podziękowania za nieocenione wsparcie, merytoryczne wskazówki oraz okazane zrozumienie i życzliwość podczas pisania tej pracy doktorskiej. Profesjonalizm oraz zaangażowanie Pana Profesora były dla mnie ogromnym źródłem inspiracji i zachęty do pokonywania naukowych wyzwań. Jestem wdzięczny za wszystkie rozmowy, które poszerzyły moje horyzonty oraz za możliwość pracy pod kierunkiem Pana Profesora, co było dla mnie prawdziwym zaszczytem.

Wyrozumiałość i cierpliwość, te dwa słowa skrywają bardzo wiele...

Pracę tę dedykuję mojej najbliższej rodzinie: Patrycji, Celinie, Dagmarze oraz Rodzicom

Rozprawa doktorska została wykonana w ramach programu "Doktorat wdrożeniowy", finansowanego z budżetu Państwa i realizowanego przy współpracy Politechniki Poznańskiej oraz Fabryki Armatur „Swarzędz” sp. z o.o., Umowa nr DWD/4/22/2020

Opiekun pomocniczy: mgr inż. Michał Lehmann

## Spis treści

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| STRESZCZENIE .....                                                                                                                          | 7  |
| ABSTRACT.....                                                                                                                               | 8  |
| 1. WPROWADZENIE .....                                                                                                                       | 9  |
| 1.1. Geneza problemu.....                                                                                                                   | 9  |
| 2. ANALIZA LITERATURY ZWIĄZANEJ Z TEMATEM PRACY.....                                                                                        | 13 |
| 2.1. Sterowanie procesem produkcji w przedsiębiorstwie .....                                                                                | 13 |
| 2.1.1. Sterowanie procesem produkcji w kontekście efektywności przedsiębiorstwa .....                                                       | 16 |
| 2.1.2. Trendy i innowacje w obszarze sterowania produkcją .....                                                                             | 19 |
| 2.2. Adaptacyjne sterowanie procesem produkcji .....                                                                                        | 22 |
| 2.2.1. Definicja i cele adaptacyjnego sterowania procesem produkcji - wspomaganie podejmowania decyzji w obszarze sterowania produkcją..... | 22 |
| 2.2.2. Pozyskiwanie danych oraz odkrywanie wiedzy .....                                                                                     | 24 |
| 2.2.3. Metody oceny stanu procesu produkcji.....                                                                                            | 25 |
| 2.2.4. Sztuczna inteligencja w procesie sterowania produkcją .....                                                                          | 26 |
| 2.3. Technologie cyfrowe wspierające sterowanie procesem produkcji – rola systemów MES (ang. Manufacturing Execution System).....           | 29 |
| 2.4. Pomiar i ocena postępów w osiąganiu kluczowych celów sterowania produkcją.....                                                         | 32 |
| 2.4.1. Cechy wskaźników efektywności.....                                                                                                   | 32 |
| 2.4.2. Metody pozwalające dobrać, wdrożyć i utrzymać system wskaźników KPI.....                                                             | 36 |
| 2.5. Wnioski z badań literaturowych.....                                                                                                    | 39 |
| 3. CEL I ZAKRES PRACY .....                                                                                                                 | 41 |
| 4. PROCES PRODUKCJI KORPUSU WODOMIERZA W FAS .....                                                                                          | 46 |
| 4.1. Stosowana technologia, przepływ informacji oraz podejmowanie decyzji w procesie – stan wyjściowy .....                                 | 46 |
| 4.2. Założenia projektowe .....                                                                                                             | 50 |
| 4.2.1. Badania ankietowe - gotowość i potencjał do wdrażania elementów koncepcji Przemysłu 4.0 w MŚP branży metalowej.....                  | 50 |
| 4.2.2. Wyznaczenie strategii przedsiębiorstwa oraz wyznaczenie celów .....                                                                  | 53 |
| 4.2.3. Model hierarchicznej struktury wskaźników wspomagający proces adaptacyjnego sterowania produkcją.....                                | 57 |
| 4.2.4. Identyfikacja parametrów systemu produkcyjnego korpusu wodomierza na potrzeby repliki cyfrowej.....                                  | 63 |
| 4.2.5. Model decyzyjny do adaptacyjnego sterowania produkcją i oceny jakości procesu oraz wyrobu.....                                       | 68 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. WDROŻENIE: ZINTEGROWANY SYSTEM DO ADAPTACYJNEGO STEROWANIA PROCESEM PRODUKCJI KORPUSÓW WODOMIERZA .....     | 80  |
| 5.1. Rozbudowa infrastruktury linii produkcji korpusu wodomierza o elementy umożliwiające jej cyfryzację ..... | 80  |
| 5.2. Oprogramowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego systemu sterowania produkcją .....                     | 90  |
| 6. WALIDACJA SYSTEMU DO ADAPTACYJNEGO STEROWANIA PRODUKCJĄ KORPUSU WODOMIERZA .....                            | 99  |
| 7. PODSUMOWANIE UZYSKANYCH WYNIKÓW I PLAN DALSZYCH DZIAŁAŃ ..                                                  | 108 |
| 7.1. Wnioski dotyczące tez pracy, problemów badawczych .....                                                   | 108 |
| 7.2. Wnioski poznawcze .....                                                                                   | 110 |
| 7.3. Wnioski użytkowe i wdrożeniowe .....                                                                      | 110 |
| 7.4. Wnioski dotyczące dalszych badań .....                                                                    | 111 |
| ZAŁĄCZNIKI .....                                                                                               | 113 |
| SPIS RYSUNKÓW .....                                                                                            | 147 |
| SPIS TABEL .....                                                                                               | 149 |
| SPIS ZAŁĄCZNIKÓW .....                                                                                         | 150 |
| BIBLIOGRAFIA .....                                                                                             | 152 |

## STRESZCZENIE

W pracy doktorskiej zaprezentowano opracowany system do adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych. Skuteczność rozwiązania potwierdzono dzięki przeprowadzonemu wdrożeniu w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym. Opracowana i dokładnie scharakteryzowana autorska metodyka prowadzi czytelnika krok po kroku przez wszystkie etapy służące budowie kompletnego systemu, umożliwiając jej wykorzystanie i dostosowanie do potrzeb dowolnego przedsiębiorstwa. Wpisuje się to w oczekiwania przedsiębiorców, którzy nieustannie poszukują rozwiązań, które pozwolą im kompleksowo i efektywnie, zbierać, przetwarzać i analizować duże zbiory danych i informacji, aby podejmować bardziej trafne decyzje zarządcze.

Przeprowadzona analiza literatury ukazuje problematykę adaptacyjnego sterowania procesem produkcji wykorzystującym technologie cyfrowe, zarówno na tle już dobrze znanych systemów zarządzania, metod wspomagających sterowanie procesem produkcji, metod pozwalających dobrać, wdrożyć i utrzymać system kluczowych wskaźników efektywności, jak również z uwzględnieniem najnowszych osiągnięć na polu naukowym i inżynierskim dotyczącym metod oceny stanu procesu wytwarzania, sztucznej inteligencji, czy cyfrowych bliźniaków. Wpisuje się to w opisaną również w pracy koncepcję Przemysłu 4.0 i Przemysłu 5.0.

Zaproponowane w dysertacji doktorskiej uniwersalne podejście służące budowie i wdrożeniu systemu do adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji z wykorzystaniem technologii cyfrowych oparto na szczegółowym schemacie badań własnych. Zaprezentowanie całego toku postępowania na konkretnym przypadku procesu produkcji korpusów wodomierza realizowanego w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym, jakim jest Fabryka Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. pozwoliło na przystępne przedstawienie poruszanych problemów i zagadnień, a także umożliwiło późniejszą walidację całego opracowanego rozwiązania.

W części wdrożeniowej pracy szczegółowo ukazano cały proces budowy zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji korpusów wodomierza. Obejmowało to kwestie związane z rozbudową infrastruktury dedykowanej linii produkcyjnej o elementy umożliwiające jej cyfryzację, a także oprogramowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego systemu sterowania produkcją. Pozwoliło to na ukazanie przeprowadzonego i wymaganego zakresu prac zarówno od strony programistycznej jak i zapotrzebowania na niezbędne wyposażenie komputerowe i sieciowe.

W rezultacie wykonanych prac badawczych i wdrożeniowych przeprowadzono walidację całego systemu. Uzyskane wyniki, oparte na wyznaczonych wcześniej, odpowiadających potrzebom przedsiębiorstwa kluczowych wskaźnikach efektywności, potwierdziły skuteczność zaproponowanego rozwiązania. Dzięki przeprowadzonej analizie literatury, pozwalającej skorzystać z wybranych najlepszych elementów funkcjonujących dotychczas metod i rozwiązań, przeprowadzonych badaniach i wdrożeniu, pozwalających testować i weryfikować przyjęte założenia, opracowano skuteczny system do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza wykorzystujący aktualne zdobycze cyfrowego rozwoju.

## ABSTRACT

The doctoral dissertation presents the developed concept of a system for adaptive control of a selected production process, and through the implementation of digital technologies, it demonstrates its successful deployment in a medium-sized metal company. The created and thoroughly characterized proprietary methodology guides the reader step by step through all stages leading to the construction of a complete system, enabling its use and adaptation to the needs of any enterprise. This approach aligns with the expectations of entrepreneurs who are constantly seeking solutions that allow them to comprehensively and efficiently collect, process, and analyze large datasets and information to make more accurate management decisions.

The conducted literature review highlights the issues of adaptive control of the production process using digital technologies, both in the context of well-known management systems, methods supporting production process control, and methods for selecting, implementing, and maintaining a system of key performance indicators. Additionally, it addresses the latest scientific and engineering advancements related to process evaluation methods, artificial intelligence, and digital twins. This discussion is also linked to the concepts of Industry 4.0 and Industry 5.0, as described in the dissertation.

The proposed universal approach to the construction and implementation of an adaptive production process control system utilizing digital technologies is based on a detailed framework of original research. The presentation of the entire procedure through the specific case of the production process of water meter bodies in a medium-sized metal company, Fabryka Armatur "Swarzędz" sp. z o.o., allowed for a clear demonstration of the discussed issues and challenges, while also laying the foundation for the subsequent validation of the developed solution.

The implementation section of the dissertation presents in detail the entire process of building an integrated system for adaptive control of the selected production process of water meter bodies. This included aspects related to the expansion of the production line infrastructure with elements enabling its digitization, as well as the development of the decision-making model software for the adaptive production control system. This made it possible to demonstrate the scope of work carried out and required both from the programming side and in terms of the necessary computer and network equipment.

As a result of the conducted research and implementation work, the entire system was validated. The obtained results, based on key performance indicators previously defined to meet the company's needs, confirmed the effectiveness of the proposed solution. Thanks to the literature review, which allowed the selection of the best elements from existing methods and solutions, as well as the conducted research and implementation, which enabled testing and verification of the adopted assumptions, an effective system for adaptive control of the water meter body production process, utilizing the latest achievements in digital development, was developed.

# 1. WPROWADZENIE

## 1.1. Geneza problemu

Wraz z ciągłym rozwojem przedsiębiorstw produkcyjnych, nierozzerwalnym elementem ich działalności stało się ustawiczne dążenie do doskonalenia procesów produkcyjnych pod względem ich efektywności technologicznej oraz organizacyjnej (Meller i in., 2023). Rozwój oparty jest na innowacyjnych technologiach i adaptacji do szybko zmieniających się rynkowych potrzeb i wymagań (Mróz i in., 2024). Przedsiębiorstwa inwestują w cyfryzację, automatyzację oraz wykorzystanie sztucznej inteligencji, aby zwiększyć swoją efektywność i konkurencyjność. Niezbędnym elementem nowoczesnego podejścia biznesowego jest również zrównoważony rozwój, który obejmuje dbałość o środowisko naturalne oraz społecznie odpowiedzialne praktyki biznesowe. Koncepcje zarządzania, takie jak Lean Manufacturing oraz te najnowsze, Green Manufacturing i Sustainable Manufacturing, wymuszają świeże spojrzenie na zarządzanie procesami produkcyjnymi, skupiając się na eliminacji marnotrawstwa i usprawnianiu procesów, aby zwiększyć wydajność i zredukować koszty, ale także łączą aspekty ekonomiczne, ekologiczne i społeczne, dążąc do odpowiedzialnego zarządzania zasobami (Dornfeld, 2013) (Paul i in., 2014) (Leong i in., 2019) (Kumar i in., 2024) (Jasiulewicz-Kaczmarek, 2024). Dzięki tym podejściom, nowoczesne przedsiębiorstwa są w stanie skutecznie konkurować na wymagającym globalnym rynku, tworząc innowacyjne produkty i usługi, które spełniają oczekiwania współczesnych konsumentów.

Występująca w skali całego globu niepewność gospodarcza, spowodowana początkowo pandemią, w dalszej kolejności konfliktem w Ukrainie, a także wynikające z tego zerwane łańcuchy dostaw oraz niespotykany w ostatnich latach wzrost kosztów prowadzenia działalności gospodarczej w Polsce, wpłynęły w efekcie na znaczące zmiany w długofalowej strategii przedsiębiorstw produkcyjnych, które koncentrują się na utrzymaniu swojej konkurencyjności na rynku (Mykhnenko i in., 2022) (Bernat & Duda, 2023). W związku z tym, przedsiębiorstwa te, posiadające złożone procesy biznesowe, znajdują się obecnie pod jeszcze większą presją ograniczeń, niż kiedykolwiek wcześniej (Wang i in., 2023). Wiele z nich, dotkniętych kryzysem, redefiniuje swoje cele strategiczne, dążąc do skrócenia łańcuchów i terminów dostaw, zwiększenia elastyczności produkcji oraz podejmuje próbę ekspansji na nowe rynki zbytu (Huawei, 2022). Nowe warunki gospodarcze i polityczne oraz stale ewoluujące wymagania klientów, wymuszają dalsze doskonalenie metod zarządzania procesami produkcyjnymi oraz adaptację systemów produkcyjnych, celem zwiększenia ich elastyczności, produktywności i niezawodności (Pizoń & Gola, 2023). Również Fabryka Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. (FAS), czyli średniej wielkości przedsiębiorstwo metalowe, w którym przeprowadzono badania i wdrożenie, bierze aktywny udział we wszystkich tych rynkowych przemianach. FAS, aby utrzymać się na rynku, zobligowana jest nie tylko do podołania wyzwaniom związanym z jej otoczeniem zewnętrznym, np. społeczno-kulturowym (ang. work life balance), ekonomiczno-prawnym (częste zmiany w ustawodawstwie), geopolitycznym (nieprzewidywalne zdarzenia), technologicznym (digitalizacja), ale tym bardziej musi sprawnie adaptować się do bieżącej sytuacji, odpowiednio kształtując swoją politykę wewnętrzną odnoszącą się do własnej organizacji i metod zarządzania (KPMG &

Microsoft, 2022) (PARP & Chaber P, 2021). Próby odpowiedzi na te pojawiające się wyzwania skłaniają przedsiębiorców, w tym także FAS, do opracowania własnej strategii zarządzania przedsiębiorstwem, w tym sterowania procesem produkcji, w oparciu o nowoczesne metody prowadzenia biznesu wykorzystujące szybki dostęp do dużych zbiorów danych, niejednokrotnie możliwych do pozyskania w czasie rzeczywistym. Jest to możliwe dzięki gwałtownemu rozwojowi technologii informatycznych i towarzyszącej temu powszechnej cyfryzacji. Znamienne jest to, iż przedsiębiorstwa przemysłowe chcące utrzymać się na konkurencyjnym rynku powinny stale monitorować zmiany następujące w swojej branży, już nie tylko pod względem technologicznym (maszyny, urządzenia, narzędzia), ale w dużej mierze pod względem szybkości przetwarzania danych oraz dostępu do informacji na każdym poziomie decyzyjnym. W świecie tak szybko rozwijającym się pod względem cyfryzacji samo skupienie się na podstawowej technologii wytwórczej jest już dalece niewystarczające (Khan i in., 2021) (Liao i in., 2017) (Meindl i in., 2021). Brak zaimplementowania nowoczesnych rozwiązań informatycznych w odpowiednim czasie może spowodować, że dystans, który wytworzy się do liderów innowacyjności, będzie trudny do odrobienia. Stąd też niezmiernie ważne jest opracowanie odpowiedniej strategii wdrożeniowej, która określi ramy do zrównoważonego rozwoju informatycznego (Cottrino i in., 2020) (Frank i in., 2019) (Müller i in., 2018). Jednak, aby wkroczyć na ścieżkę informatycznego i organizacyjnego rozwoju, wykorzystując potencjał w przepływie i dostępie do informacji, należy dokładnie przeanalizować obecny stan swojej firmy, jej ograniczenia i możliwości, by w ten sposób jasno określić przejrzystą metodykę postępowania, według której na wszystkich szczeblach decyzyjnych będzie postępowało całe przedsiębiorstwo (Meller i in., 2022).

W związku z powyższym w szczególnym miejscu na globalnym rynku znajdują się małe i średnie przedsiębiorstwa produkcyjne, które są filarami wielu światowych gospodarek (POLSKA AGENCJA ROZWOJU PRZEDSIĘBIORCZOŚCI, 2021). To od przeprowadzonych zmian i rozwoju w zakresie cyfryzacji i organizacji procesów produkcyjnych w tym segmencie przedsiębiorstw, będzie zależał dalszy los wielu gałęzi przemysłu (Bigliardi i in., 2020) (Thiede i in., 2016). Dotyczy to także przedsiębiorstw produkcyjnych z branży metalowej, które w przeważającej większości przypadków są pierwszymi w całych łańcuchach wytwórczych. Z tego względu to właśnie od ich podejścia do wdrażania innowacyjnych rozwiązań technologicznych oraz organizacyjnych, w zdecydowany sposób wpływających na efektywność prowadzonej działalności, będzie zależała końcowa dostępność, jakość i cena złożonych produktów.

Zaczątkiem dynamicznych zmian następujących w przedsiębiorstwach w ostatnich latach były technologie mieszczące się w ramach koncepcji Przemysłu 4.0, których intensywny rozwój trwa do dziś. Przedstawiona w tej koncepcji idea opiera się na integracji systemów informatycznych oraz wiedzy, a także tworzeniu sieci, dążącej do powstania systemu cyberfizycznego (CPS), bazującego na heterogenicznych danych (Monostori i in., 2016). Obejmuje ona cyfrową integrację systemów produkcyjnych oraz tworzenie niezależnych, autonomicznych sterowanych cyfrowo sieci złożonych z czujników i maszyn, mogących bezpośrednio komunikować się między sobą, a także wymieniać informację z ludźmi nadzorującymi ich pracę. Do kluczowych technologii związanych z Przemysłem 4.0 możemy zaliczyć oprócz wspomnianych systemów CPS jeszcze, m.in. (Oussous i in., 2018) (Chen i in.,

2017) (Khang A i in., 2024): przemysłowy internet rzeczy (ang. Internet of Things - IIoT), sztuczną inteligencję (ang. Artificial Intelligence - AI), cyfrowego bliźniaka (ang. Digital Twin), chmurę obliczeniową (ang. cloud computing), Big Data (duże, złożone i różnorodne zbiory danych), wirtualną i rozszerzoną rzeczywistość (ang. Virtual Reality - VR i ang. Augmented Reality - AR), roboty współpracujące i roboty mobilne, RFID (ang. Radio-Frequency Identification). Z kolei koncepcja Przemysłu 5.0 to najnowsza faza rozwoju przemysłu, która koncentruje się na integracji zaawansowanych technologii, takich jak sztuczna inteligencja, robotyka oraz Internet Rzeczy, z ludzką kreatywnością i umiejętnościami (Leng i in., 2022). Jej celem jest dążenie do bardziej zrównoważonych, elastycznych i spersonalizowanych procesów produkcyjnych. Rozwój Przemysłu 5.0 zapoczątkowano w roku 2020, jako naturalną ewolucję po Przemysle 4.0, który to kładzie nacisk na cyfryzację i automatyzację produkcji (Xu i in., 2021). Przemysł 5.0 natomiast skupia się bardziej na współpracy między ludźmi, a maszynami, co pozwala na osiągnięcie wyższego poziomu innowacyjności i efektywności. Technologie wykorzystywane w koncepcji Przemysłu 5.0 zostaną przedstawione w dalszej części pracy.

Bezpośrednia komunikacja, związany z nią przepływ informacji oraz nierozzerwalnie powiązana z nimi dostarczana wiedza są jednymi z najbardziej wartościowych zasobów, jakie pozostają w bieżącej dyspozycji każdego przedsiębiorstwa produkcyjnego. Pozyskanie danych, jakość ich przetworzenia, interpretacji, a także dystrybucji w znacznym stopniu przekłada się na uzyskanie kompletnych i użytecznych informacji. Łańcuch obiegu informacji w przedsiębiorstwie powinien być krótki, co przyspieszy podejmowanie decyzji zarządczych oraz przejrzysty, gdyż wyeliminuje to szum informacyjny i wskaże odpowiednią ścieżkę jego przepływu w organizacji. Powinien być także dynamiczny, aby informacja była zawsze jak najbardziej aktualna, co umożliwi efektywne sterowanie procesami produkcyjnymi, czy szerzej patrząc, efektywne zarządzanie przedsiębiorstwem. Dysponowanie sprawdzonymi informacjami pozwala decydentom na podejmowanie skutecznych decyzji zarządczych na różnych szczeblach zarządzania z wykorzystaniem najnowszych zdobyczy ciągłego cyfrowego rozwoju w oparciu o stale dostępne, aktualne i zweryfikowane dane. Pozwala to na budowanie efektywnej strategii zarządzania i uzyskanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa, co powinno przełożyć się na jego sukces na wielu poziomach zarządzania i w wielu aspektach.

Przedstawione zmiany wymuszają nieustanne poszukiwanie rozwiązań, metod i narzędzi umożliwiających efektywne pozyskiwanie wiarygodnych informacji (parametrów, danych, wskaźników) i dalsze ich przetwarzanie w celu podejmowania skutecznych decyzji zarządczych w procesach sterowania produkcją. Na tym etapie działania pojawiają się specyficzne problemy, które pozwalają na postawienie następujących pytań:

1. Jeżeli w każdym przedsiębiorstwie można dostrzec jego unikalne cechy ze względu na rodzaj prowadzonej działalności, wielkość, posiadane zasoby i wiedzę itp. to czy jest możliwość zaproponowania zintegrowanego podejścia wspomagającego proces sterowania produkcją?
2. Jakie należy zaproponować i przyjąć miary efektywności, aby skutecznie mierzyć i oceniać postęp w osiąganiu wyznaczonych celów adaptacyjnego sterowania produkcją dla specyficznej organizacji?

3. Jakich metod i narzędzi użyć, aby skutecznie zbudować zintegrowany system do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji umożliwiający efektywne zarządzanie?

Podsumowując, wpływ na procesy produkcyjne ma wiele czynników z wielu obszarów oddziaływania: organizacyjnego, logistycznego, eksploatacyjnego (wyposażenia logistycznego), technologicznego, środowiskowego, związanego z bezpieczeństwem i ergonomią pracy. Nakładają się na to uwarunkowania polityczno-gospodarcze: prawne, finansowe, kulturowe, geopolityczne. W tak zmiennym środowisku oddziałującym na prowadzenie działalności gospodarczej, obszar produkcyjny przedsiębiorstwa, a w szczególności efektywne nim sterowanie ma zasadnicze znaczenie dla uzyskania końcowego pozytywnego wyniku biznesowego. Dzięki wykorzystaniu doświadczenia z posiadanej praktyki w organizacji i zarządzaniu oraz przeprowadzonej obserwacji i badaniom autor pracy stwierdził, iż w działalności przedsiębiorstw istnieje luka obejmująca opracowanie koncepcji zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji wykorzystującym różnorodne techniki wytwarzania na wielu stanowiskach produkcyjnych, opartego na metodach wspomagania decyzji i kluczowych wskaźnikach efektywności KPI (ang. Key Performance Indicators).

## 2. ANALIZA LITERATURY ZWIĄZANEJ Z TEMATEM PRACY

### 2.1. Sterowanie procesem produkcji w przedsiębiorstwie

Skuteczne sterowanie procesem produkcji w przedsiębiorstwie jest istotnym elementem zapewnienia jego konkurencyjności i zrównoważonego rozwoju. Sterowanie procesami produkcyjnymi oraz efektywnym wykorzystaniem zasobów stanowi fundament sprawnego funkcjonowania każdej organizacji produkcyjnej. W tym kontekście posiadane zasoby przedsiębiorstwa można zdefiniować jako wszelkie elementy, które są niezbędne do realizacji procesów produkcyjnych w tym przedsiębiorstwie. Obejmuje to szeroki ich zakres, który można podzielić na kilka głównych kategorii (Wit de & Meyer, 2007) (Bingham & Eisenhardt, 2008) (Krupski, 2014) (Kardas & Wójcik-Augustyniak, 2017):

- zasoby ludzkie: pracownicy zaangażowani w proces produkcji, w tym operatorzy maszyn, inżynierowie, menedżerowie produkcji, personel utrzymania ruchu oraz pracownicy administracyjni,
- zasoby materialne: surowce, półprodukty, komponenty i materiały potrzebne do produkcji końcowych wyrobów. Obejmuje to również narzędzia i części zamienne,
- zasoby techniczne: maszyny, urządzenia, linie produkcyjne i inne technologie stosowane w procesie produkcyjnym. Obejmuje to także systemy informatyczne wspierające produkcję, takie jak systemy ERP (ang. Enterprise Resource Planning), MES (ang. Manufacturing Execution Systems) itp.,
- zasoby finansowe: kapitał niezbędny do zakupu surowców, opłacania pracowników, utrzymania infrastruktury oraz inwestycji w rozwój technologii i innowacji,
- zasoby informacyjne: dane i informacje potrzebne do zarządzania procesem produkcyjnym, w tym plany produkcyjne, harmonogramy, dane o wydajności oraz informacje zwrotne z rynku i od klientów,
- zasoby energetyczne: energia elektryczna, gaz, paliwa i inne źródła energii niezbędne do napędzania maszyn i utrzymania ciągłości procesów produkcyjnych,
- zasoby niematerialne: własność intelektualna (patenty, licencje, znaki towarowe, prawa autorskie, tajemnice handlowe), wartość marki i reputacja, kultura organizacyjna, relacje z klientami i dostawcami.

Zasoby odgrywają fundamentalną rolę w przedsiębiorstwie, ponieważ stanowią podstawę do realizacji wszystkich procesów produkcyjnych i operacyjnych. Pracownicy dostarczają wiedzę i umiejętności, materiały są niezbędne do wytwarzania produktów, maszyny i urządzenia umożliwiają efektywną produkcję, kapitał finansuje działalność, dane wspierają podejmowanie decyzji, a energia zasila cały proces. Skuteczne zarządzanie zasobami pozwala na zwiększenie wydajności, redukcję kosztów i poprawę jakości produktów oraz usług, czyli umożliwia dążenie do osiągnięcia założonych celów w przedsiębiorstwie.

Niniejszy rozdział ma zatem na celu przybliżenie różnorodnych strategii sterowania produkcją, które są stosowane w przedsiębiorstwach oraz ich znaczenia dla osiągnięcia strategicznych celów operacyjnych i biznesowych. Poprzez dogłębną analizę teoretyczną oraz praktyczne studium przypadku, przedstawiony został istotny wpływ skutecznego sterowania

produkcją na efektywność, elastyczność oraz konkurencyjność przedsiębiorstwa. Ostatecznym celem jest wdrożenie najlepszych praktyk oraz wytyczenie ścieżek rozwoju w dziedzinie sterowania produkcją, które mogą wspomóc przedsiębiorstwa w osiągnięciu doskonałości operacyjnej i trwałego sukcesu na rynku.

Same pojęcie „sterowania” określa się jako: „oddziaływanie mające na celu zapewnienie zachowania obiektu w żądany sposób lub w sposób zbliżony do żadanego albo realizację żadanego celu” (Encyklopedia PWN, 2024). Natomiast rozszerzając to pojęcie do „sterowania produkcją”, obejmuje wtedy ono szereg zagadnień i aspektów związanych z logistyką, utrzymaniem ruchu, kontrolą jakości, technicznym przygotowaniem produkcji oraz oczywiście samą działalnością produkcyjną. Ogólnie można przyjąć, iż jest to kompleksowy proces zarządzania operacjami produkcyjnymi w przedsiębiorstwie, uwzględniający planowanie, organizację, koordynację i kontrolę wszystkich działań związanych z produkcją wyrobów lub dostarczaniem usług. Literatura przedmiotu wskazuje, jednakże na wiele definicji tego pojęcia, różniących się między sobą, z których każda podkreśla różne aspekty procesu zarządzania produkcją. Z tego względu w tabeli 2.1 zestawiono wybrane definicje sterowania produkcją:

*Tab. 2.1 Wybrane definicje sterowania produkcją*

| Lp. | Definicja                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Działalność polegająca na zarządzaniu procesem produkcyjnym, tak aby działał efektywnie (Cambridge Business English Dictionary, 2024)                                                                                                                                                                                                  |
| 2   | Systematyczne planowanie, koordynacja i kierowanie wszystkimi działaniami produkcyjnymi i zależnościami, aby zapewnić terminową produkcję towarów, odpowiedniej jakości i w rozsądnych kosztach (Merriam-Webster, 2024)                                                                                                                |
| 3   | Funkcja kierowania lub regulowania przepływu towarów przez cały cykl produkcyjny, począwszy od zgłaszania zapotrzebowania na surowce, aż do dostarczenia gotowych produktów (APICS, 2024)                                                                                                                                              |
| 4   | Działalność obejmująca planowanie, kontrolowanie, ocenę i regulację zarówno operacji produkcyjnych, jak i obciążenia zasobów produkcyjnych oraz przepływu materiałów w sferze produkcji, w zakresie od planowania zapotrzebowania materiałowego, do spływu wyrobu gotowego z produkcji (Śliwczyński, 2008)                             |
| 5   | Zespół działań zmierzających do uzyskania przez system produkcyjny i przedsiębiorstwo, oczekiwanych – założonych uprzednio – efektów (Pająk, 2006)                                                                                                                                                                                     |
| 6   | Działalność obejmująca planowanie, kontrolę i regulację przepływu materiałów w sferze produkcji, począwszy od określenia zapotrzebowania na surowce, a skończywszy na wykonaniu gotowego wyrobu (Głowacka-Fertsch & Fertsch, 2004)                                                                                                     |
| 7   | Sterowanie produkcją to działanie polegające na monitorowaniu i kontrolowaniu określonej produkcji lub operacji. Sterowanie produkcją często odbywa się w wyznaczonym pomieszczeniu operacyjnym. Sterowanie produkcją w połączeniu z kontrolą zapasów i jakości jest jedną z kluczowych funkcji zarządzania operacyjnego (Arora, 2004) |
| 8   | Sterowanie produkcją to zarządzanie materiałami, maszynami i personelem poprzez sekwencjonowanie, planowanie, inicjowanie oraz śledzenie zamówień produkcyjnych w taki sposób, aby wymagane ilości, jakość i obsługa klienta były osiąganymi w sposób efektywny i niezawodny, przy minimalnych kosztach (McKay & Wiers, 2004)          |
| 9   | Ciągła korekta planów i harmonogramów w świetle zebranych danych operacyjnych (Bock & Holstein, 1963)                                                                                                                                                                                                                                  |

|    |                                                                                                                                                                                                                                     |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 | Konieczne jest, aby dział produkcji miał dostarczone surowce w odpowiednim czasie, aby maszyny były dostępne do produkcji materiałów w odpowiednim czasie oraz aby pracownicy byli dostępni do pracy na maszynach (O'Donnell, 1952) |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Cechą wspólną wszystkich podanych definicji jest koncentracja na sterowaniu procesem produkcyjnym w celu zapewnienia efektywności, terminowości i jakości wytwarzania produktów. Każda z definicji w szczególności podkreśla różne aspekty tego sterowania, począwszy od dostępności i zarządzania zasobami, przez planowanie, monitorowanie, regulację i kontrolowanie procesu, a skończywszy na odniesieniu się do ponoszonych kosztów. W ocenie autora pracy skuteczne sterowanie produkcją, powinno zmierzać do uzyskania zamierzonego efektu biznesowego, czyli sprzyjać ograniczaniu kosztów oraz sprzyjać osiąganiu zysku. Z tego względu wszystkie systematyczne działania wykonywane w ramach sterowania produkcją powinny brać pod uwagę również ich wpływ na finanse przedsiębiorstwa i podlegać stałemu monitorowaniu. Literatura przedmiotu stawia w tym kontekście szereg podstawowych zadań dla efektywnego sterowania produkcją, do których zalicza się (Oakland, 2007) (Zawadzki & Żywicki, 2016) (Hamrol, 2022):

- przydział zasobów ludzkich do różnych zadań produkcyjnych,
- planowanie konserwacji maszyn w celu minimalizacji czasu przestoju,
- monitorowanie poziomów zapasów surowców i gotowych produktów,
- koordynację z dostawcami w celu zapewnienia terminowej dostawy materiałów,
- planowanie harmonogramów produkcji na podstawie prognoz popytu i dostępnych zasobów,
- komunikowanie harmonogramów produkcji i jego aktualizacji odpowiednim interesariuszom w organizacji – zapewnienie przepływu informacji,
- wdrażanie środków kontroli jakości w celu zapewnienia spełnienia standardów produktów – wyznaczanie bieżących priorytetów,
- zbieranie i analizę danych produkcyjnych w celu zidentyfikowania obszarów do poprawy i zwiększenia efektywności – śledzenie i raportowanie z przebiegu procesu produkcji,
- dostosowywanie harmonogramów produkcji w odpowiedzi na zmiany w popycie lub nieprzewidziane zdarzenia.

Mnogość obszarów przedsiębiorstwa do monitorowania, składających się z wielu elementów, generujących olbrzymie ilości informacji, danych, parametrów, zmiennych tworzy złożony system produkcyjny, którego analiza celem podjęcia skutecznej decyzji zarządczej, w odpowiednim czasie, w obszarze sterowania procesem produkcji jest wysoce utrudniona. W odpowiedzi na szereg wyzwań, które mogą wystąpić w dynamicznym i zmiennym środowisku produkcyjnym zaprojektowano i wprowadzono rozwiązania oparte na adaptacyjnym sterowaniu produkcją. Ten rodzaj sterowania opiera się na zdolności systemów produkcyjnych do automatycznego dostosowywania się do nowych pojawiających się warunków i wymagań, co przekłada się na większą elastyczność i efektywność produkcji. Podejście adaptacyjne obejmuje monitoring i analizę danych produkcyjnych w czasie rzeczywistym oraz dynamiczne dostosowywanie parametrów produkcji na podstawie

zebranych informacji. Dzięki temu przedsiębiorstwa mogą szybko reagować na zmiany popytu, awarie sprzętu, czy też dostosowywać wykorzystanie zasobów w celu osiągnięcia lepszych wyników operacyjnych i finansowych.

### **2.1.1. Sterowanie procesem produkcji w kontekście efektywności przedsiębiorstwa**

Nadrzędnym celem każdego przedsiębiorstwa, w tym produkcyjnego jest tworzenie wartości dodanej dla klientów oraz przynoszenie zysku. Tworzenie wartości dodanej w procesie produkcji to niezbędny element zarządzania operacyjnego, który koncentruje się na zwiększaniu wartości wyrobów na każdym jego etapie. Wartość dodana oznacza różnicę pomiędzy kosztami surowców i materiałów, a wartością końcowego produktu, który jest oferowany klientowi. Proces ten polega na usprawnianiu wszystkich czynników produkcyjnych, aby maksymalizować efektywność i jakość przy jednoczesnym minimalizowaniu kosztów i strat. W praktyce oznacza to identyfikację i eliminację działań, które nie przyczyniają się do zwiększenia wartości produktu, takich jak m.in. marnotrawstwo, nadmiarowe procesy czy nieefektywne operacje. Proces tworzenia wartości dodanej weryfikowany jest poprzez różnorodne wskaźniki i metody analityczne, takie jak analiza wartości, mapowanie strumienia wartości VSM (ang. Value Stream Mapping) czy analiza kosztów. Istotnym jest przeanalizowanie, zrozumienie i odpowiednie mapowanie procesu produkcji, aby określić, które elementy przynoszą wartość, a które są źródłem strat. Weryfikacja wartości dodanej obejmuje również analizę wskaźników wydajności oraz wskaźników jakości, o których szerzej będzie mowa w dalszej części pracy.

W tym kontekście skuteczne sterowanie procesem produkcji jest niezbędne dla zapewnienia optymalnego wykorzystania zasobów, minimalizacji kosztów i maksymalizacji produkcji, czyli działanie na polu szeroko rozumianej efektywności (Legutko, 2004). Poprzez wdrożenie solidnych mechanizmów nadzoru produkcji, przedsiębiorstwa mogą osiągnąć większą niezawodność i jakość w swoich procesach produkcyjnych. Ponadto, efektywny nadzór nad procesem produkcji umożliwia przedsiębiorstwu szybką reakcję na zmieniające się wymagania rynku. Niemniej jednak, złożoność zadań stawianych przed sterowaniem procesem produkcji różni się w zależności od rodzaju, struktury i zróżnicowania metod produkcji stosowanych w konkretnym przedsiębiorstwie. W analizowanym przypadku FAS realizuje wieloasortymentową, zróżnicowaną i nieregularną produkcję na zamówienie, gdzie przepływ materiałów w procesie produkcyjnym może przyjmować formę niepotokową. Zakres wytwarzanych produktów jest szeroki i podlega stałym wahaniom, co sprawia, że precyzyjne prognozowanie wielkości i czasu realizacji potencjalnych zamówień jest utrudnione. Stawia to przed decydentami odpowiadającymi za obszar sterowania produkcją szereg zadań (przywołanych wcześniej), których skuteczną realizacją nakierowana jest na osiągnięcie zamierzonych celów. W przypadku FAS, zmienność tego rodzaju produkcji i dążenie do efektywnego wykorzystania posiadanych zasobów, często prowadzi do podjęcia decyzji o grupowaniu maszyn według ich rodzajów, tworząc specjalizowane komórki technologiczne, w których każdy produkt wykorzystuje tylko określone zasoby. Liczba pracowników produkcji nie zawsze pokrywa się wtedy z liczbą operatorów niezbędnych do jednoczesnego działania

wszystkich wymaganych maszyn. Ta dysproporcja jest uzasadniona ekonomicznie ze względu na nierównomierną eksploatację maszyn, gdy niektóre z nich są rzadko wykorzystywane. Stanowi to, jednakże poważne utrudnienie w zakresie planowania produkcji, jako istotnego elementu sterowania produkcją. Proces planowania produkcji w FAS jest złożonym, wieloetapowym działaniem, które obejmuje: prognozowanie zamówień (popytu), planowanie zasobów, harmonogramowanie produkcji, przydział zadań, kontrolę i monitorowanie, dostosowanie planów, dokumentację i raportowanie. Planując produkcję, a w szczególności alokując zasoby, istotne jest nie tylko zapewnienie odpowiedniego dostarczenia materiałów, ale także uzasadnione ekonomiczne wykorzystanie maszyn. W środowiskach o ograniczonych zasobach może to oznaczać priorytetyzację korzystania z maszyn kosztem zawieszenia zadań na innych zasobach produkcyjnych (Pajak & Trojanowska, 2012).

Wyróżnić można wiele systemów zarządzania oraz metod wspomagających sterowanie procesem, które mają na celu poprawę organizacji procesu produkcji przedsiębiorstwa. Każda z metod ma swoje unikalne cechy i założenia, ale wszystkie dążą do zwiększenia wydajności, redukcji marnotrawstwa i poprawy jakości. Do najczęściej stosowanych metod możemy zaliczyć:

- Lean Management – „szczupłe zarządzanie” (Stadnicka, 2021) (Bertagnolli, 2022) (Vinodh, 2023), filozofia obejmująca swoim zasięgiem, szeroki zbiór metod i koncepcji, zmierzających do skutecznego wdrożenia i utrzymania w całym przedsiębiorstwie standardów pracy pozwalających na stałe utrzymywanie wysokiej jakości i wydajności produkcji i usług, a także wysokiej efektywności ekonomicznej. Oparta jest na eliminacji marnotrawstwa poprzez ciągłe doskonalenie, nakierowane na potrzeby obsługiwanych klientów i uzyskiwanie dla nich wartości. Wytworzenie w przedsiębiorstwie odpowiedniej atmosfery oraz kultury w podchodzeniu do wykonywania codziennych obowiązków, skutkuje zintensyfikowaniem wspólnych wysiłków w dążeniu do szukania i wdrażania ulepszonych rozwiązań dla istniejących procesów. W tej metodzie najistotniejsze wskaźniki będą dotyczyły: osiągnięciu celów związanych z eliminowaniem marnotrawstwa: identyfikację strat, analizy kosztów, efektywności wyposażenia produkcyjnego itp.
- Benchmarking – analiza porównawcza (Andersen, 1999) (Stapenhurst, 2009), jest sposobem uczenia się od liderów w danej dziedzinie (branży) w jakiej funkcjonuje przedsiębiorstwo, polegającym na badaniu, porównaniu z własnymi procesami, a następnie wprowadzeniu we własnej organizacji skutecznych rozwiązań sprawdzających się u konkurencji. Cechuje się ciągłością i systematycznością działania, umożliwiającą sprawne zaadoptowanie najefektywniejszych wzorców postępowania. W założeniu metoda ta nie powinna służyć tylko do bezkrytycznej implementacji przenoszonych rozwiązań, ale być również stymulatorem do dalszego ich usprawniania. Dla tej metody najważniejsze będą wskaźniki: realizacji celów organizacji, zarządzania personelem, efektywnością pracy itp.
- TQM (ang. Total Quality Management) (Hellsten & Klefsjo, 2000) (Prajogo & Sohal, 2006) – kompleksowe zarządzanie jakością jest podejściem zorientowanym

na osiągnięcie długotrwałego sukcesu, którego podstawą jest przede wszystkim zadowolenie, spełnienie potrzeb i oczekiwań odbiorcy (zewnętrznego i wewnętrznego), a także korzyści dla samej organizacji, jej członków oraz całego społeczeństwa. Zakłada, że wszystkie czynniki w przedsiębiorstwie, a także w jego otoczeniu mają wpływ na jakość, w związku z czym realizacja każdego procesu w prowadzonej działalności powinna być efektem wykorzystania wspólnie uzyskanej wiedzy i nakierowana na aspekt projakościowy. Metoda TQM będzie preferowała wskaźniki związane z: jakością produktu i usługi, procesem doskonaleniem pracowników, efektywnością procesu itp.

- WCM (ang. World Class Manufacturing) (Hendry, 1998) (Harrison, 1998) (D’Orazio i in., 2020) – produkcja klasy światowej, system zarządzania mający na celu zmierzanie do doskonałości w realizowaniu procesów wytwórczych, przy jednoczesnym dążeniu do całkowitego wyeliminowania marnotrawstwa, wypadków przy pracy, wyrobów wadliwych oraz awarii. Wymaga zaangażowania wszystkich pracowników, na każdym szczeblu decyzyjnym, włącznie ze ścisłym kierownictwem, aby odchodząc od prostego reagowania na pojawiające się wystąpienia, przejść do ciągłego doskonalenia. Funkcjonuje na bazie dwóch filarów. Na filar techniczny składają się narzędzia wspomagające przejście do osiągnięcia perfekcji w realizowaniu bieżącej produkcji, których implementację wspierają menadżerowie, posiłkując się wytycznymi zawartymi w filarze zarządczym. W metodzie WCM najistotniejsze wskaźniki będą dotyczyły: oceny ryzyka, kosztów strat, realizacji zadań itp.

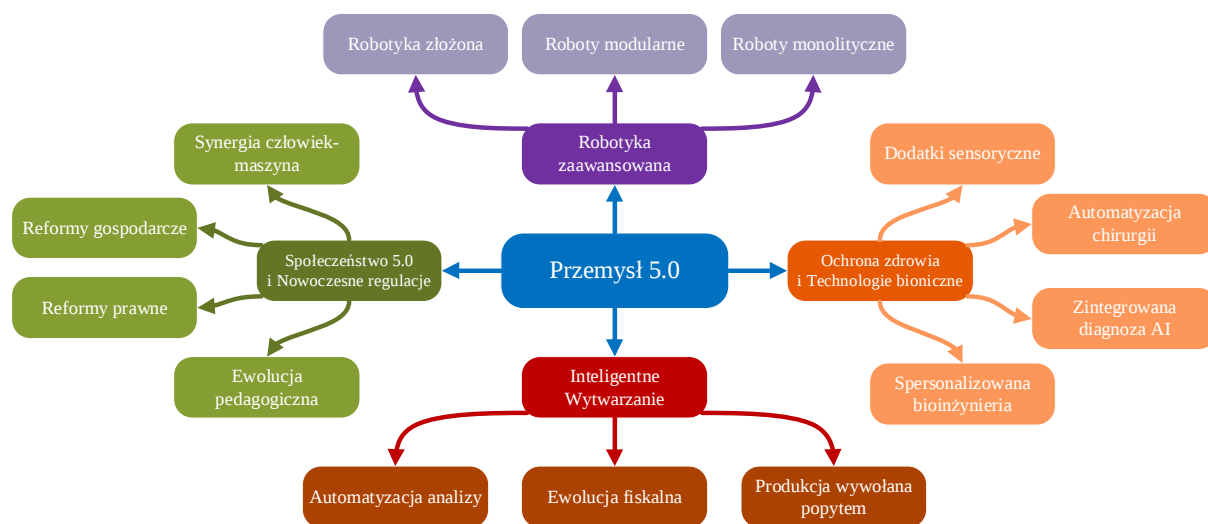
Każda z przedstawionych metod zarządzania i wspomagania sterowania procesem produkcji oferuje unikalne podejście i narzędzia do poprawy efektywności, jakości i wydajności. Wybór najlepszych cech z każdej metody powinien prowadzić do zbudowania kompleksowego systemu zarządzania, który maksymalizuje osiągane z nich korzyści. Istotne jest dążenie do eliminacji marnotrawstwa, ciągłego doskonalenia, zadowolenia klientów oraz zaangażowania wszystkich pracowników w proces doskonalenia produkcji.

Analiza systemów zarządzania oraz metod wspomagania sterowania procesem stosowanych w środowiskach produkcyjnych pozwala na uzyskanie wglądu w skuteczność i efektywność tych metod, a ponadto zrozumienie, w jaki sposób techniki zarządzania i metody sterowania procesem produkcyjnym wpływają na produktywność, wykorzystanie zasobów i zarządzanie siłą roboczą (Borkowski & Ulewicz, 2008). Najlepsze praktyki pozwalają zidentyfikować obszary do poprawy, umożliwiając przedsiębiorstwom ulepszenie swoich procesów produkcyjnych i poprawę ogólnej wydajności. Wybór odpowiedniego systemu zarządzania oraz metody wspomagania sterowania procesem, dopasowanej do branży i profilu przedsiębiorstwa wpływa na efektywność sterowania jego produkcją. Pozwala to na lepszą koordynację i synchronizację działań produkcyjnych, co prowadzi do bardziej płynnego przepływu pracy i zmniejszenia czasu bezczynności. Dodatkowo umożliwia ulepszenie alokacji zasobów, zapewniając skuteczne wykorzystanie materiałów, sprzętu i personelu w celu osiągnięcia celów produkcyjnych. Ponadto ułatwione jest zbudowanie klarownych kanałów komunikacji i struktury odpowiedzialności, wspomagając i poprawiając procesy podejmowania decyzji i zdolności do rozwiązywania problemów.

### 2.1.2. Trendy i innowacje w obszarze sterowania produkcją

W dynamicznie ewoluującym środowisku przemysłowym obszar sterowania produkcją jest ciągle kształtowany przez pojawiające się nowe trendy, innowacyjne praktyki i rozwiązania. Tempo postępu technologicznego, w połączeniu z zmieniającymi się preferencjami konsumentów, dbałością o środowisko naturalne i globalną dynamiką rynku, spowodowało znaczące przemiany w obszarze sterowania produkcją (Volz i in., 2023). Od zaawansowanej analizy danych po sztuczną inteligencję, dzięki co raz szerszemu rozpowszechnieniu i dostępowi do inteligentnych technologii produkcyjnych, przedsiębiorstwa wykorzystują innowacyjne rozwiązania, aby zwiększyć efektywność, elastyczność i poziom bezpieczeństwa w wykonywanych operacjach produkcyjnych.

Pojawienie się koncepcji takich jak Przemysł 4.0 oraz Przemysł 5.0 zrewolucjonizowało tradycyjne podejście do sterowania produkcją, wprowadzając erę połączonych i inteligentnych systemów produkcyjnych (Kishorre Annanth i in., 2021) (Dossou & Nshokano, 2024) (Cosgun, 2023) (Chakroun i in., 2023). Ogólny schemat przedstawiający zakres badanych trendów dla Przemysłu 5.0 pokazano na rysunku 2.1.



Rys. 2.1 Schemat blokowy – Przemysł 5.0 – opracowanie własne na podstawie (Duggal i in., 2022)

Przemysł 5.0 kładzie nacisk na płynną integrację jednostek ludzkich i najnowocześniejszych technologii. Bazuje on na fundamentach wypracowanych przez poprzednie rewolucje przemysłowe, zwłaszcza Przemysł 4.0, który wprowadził automatyzację, zintensyfikował łączność i procesy oparte na danych (Deniša i in., 2023). Przemysł 5.0 uznaje, że pomimo znaczących postępów w dziedzinie technologii i automatyzacji, zaangażowanie ludzi pozostaje niezbędne w środowisku przemysłowym. Ten nowy etap przewiduje przyszłość, w której ludzie i maszyny współpracują, wykorzystując swoje mocne strony, aby wspierać innowacje i rozwijać bardziej efektywne, produktywne i zrównoważone środowisko przemysłowe.

Przedstawione technologie i rozwiązania wprowadzają nowe zaawansowane rozwiązania technologiczne. Każde przedsiębiorstwo indywidualnie jednak, w tym także FAS, musi poprawnie ocenić zyski i potencjalne straty z ich zakupu i wdrożenia, biorąc pod uwagę branżę,

w której funkcjonuje i związany z nią profil produkcji. Celem jest oszacowanie szans i zagrożeń, przed rozpoczęciem procesu cyfryzacji w obszarze sterowania produkcją, a patrząc szerzej, ocena skutków przebudowy i dostosowania swojej infrastruktury informatycznej do pojawiających się potrzeb. Wydaje się bardzo trudnym wykonywanie dużych i złożonych cyfrowych skoków rozwojowych dla przedsiębiorstw nie dysponujących rozbudowanymi działami IT czy wyspecjalizowanymi komórkami R&D odpowiedzialnymi za opracowanie potrzeb organizacji i ich późniejszą implementację. Stąd też, rozsądnym podejściem jest skorzystanie z rozwiązań, które z całą pewnością zwiększą efektywność i bezpieczeństwo stosowanych rozwiązań cyfrowych (np. szybsze przesyłanie i dostęp do danych, możliwość bieżącego monitorowania procesu, odpowiednia kontrola dostępu), a samo sterowanie produkcją uczynią bardziej przystępnym, jednakże nie będą wymagały przecierania nowych szlaków od organizacji nie dysponujących odpowiednimi zasobami. Skupienie się na wykorzystaniu technologii rozwijanych w ramach koncepcji Przemysłu 4.0 długo jeszcze dla wielu przedsiębiorstw będzie granicą ich możliwości i to niejednokrotnie z różnych przyczyn również nieosiągalną. Barierą często pozostają zasoby finansowe, brak kompetentnej kadry oraz niedostosowana infrastruktura cyfrowa. Z tego względu rozsądnym wydaje się stały rozwój przedsiębiorstwa (poza przypadkami wdrożenia dedykowanych rozwiązań w danym obszarze produkcji, linii produkcyjnej czy stanowiska produkcyjnego) w obszarze cyfrowego odwzorowania rzeczywistego procesu produkcyjnego. Skuteczną odpowiedzią na pojawiające się wyzwania może być w takim przypadku opracowanie systemu informatycznego, którego funkcjonalności umożliwią cyfrowe odzwierciedlenie rzeczywistego, dowolnego procesu produkcji. Powinien on pozwalać na analizę i prognozowanie przyszłych stanów procesu przy wykorzystaniu na przykład algorytmów decyzyjnych i metod wsparcia decyzji.

Narzędziem umożliwiającym rozwiązanie przedstawionych problemów może być koncepcja cyfrowego bliźniaka (DT – Digital Twin). Cyfrowe bliźniaki to wirtualne repliki fizycznych obiektów, procesów, systemów, a nawet całych organizacji. Te cyfrowe reprezentacje są tworzone przy użyciu danych czasu rzeczywistego i zaawansowanych technik modelowania, co pozwala na symulację, analizę i ulepszenie różnych aspektów odpowiadających fizycznym odpowiednikom (Biller & Biller, 2023). Koncepcja cyfrowych bliźniaków zyskała znaczną popularność w wielu branżach ze względu na jej potencjał w dynamicznym usprawnieniu procesów rozwoju produktów, produkcji, konserwacji itp. (Emmert-Streib i in., 2023) (Negri i in., 2017).

Jednym z głównych celów cyfrowych bliźniaków jest poprawa podejmowania decyzji i rozwiązywania problemów poprzez dostarczanie praktycznych informacji na temat zachowania i wydajności fizycznych zasobów. Poprzez ciągłe monitorowanie i analizowanie danych z czujników i innych źródeł, cyfrowe bliźniaki mogą identyfikować wzorce, anomalie i potencjalne problemy przed ich eskalacją. Takie proaktywne podejście umożliwia przedsiębiorstwom poprawę wykonywanych operacji, minimalizację przestojów oraz zwiększenie ogólnej efektywności (Tbauer i in., 2021) (Yusupbekov i in., 2023).

Kolejnym możliwym zadaniem cyfrowych bliźniaków jest przewidywanie konieczności wykonywania działań obsługowych, czyli realizacji strategii obsługowej. Poprzez symulację zachowania się urządzeń i maszyn na podstawie danych czasu rzeczywistego, przedsiębiorstwa

mogą przewidywać momenty, w których będzie potrzebna konserwacja lub naprawa, umożliwiając zaplanowanie działań obsługowych w optymalnym czasie w celu zapobieżenia kosztownym niezaplanowanym przestojom. Taka zdolność przewidywania nie tylko wydłuża żywotność zasobów, ale także zmniejsza koszty konserwacji i poprawia niezawodność (van Dinter i in., 2022) (Zhong i in., 2023). Co więcej, cyfrowe bliźniaki umożliwiają zdalne monitorowanie i kontrolę zasobów i procesów. Dzięki dostępowi w czasie rzeczywistym do danych i informacji z cyfrowych bliźniaków, decydenci mogą podejmować świadome decyzje i odpowiednie działania bez względu na swoje fizyczne położenie (Rożanec i in., 2022).

Sam rozwój cyfrowy przedsiębiorstwa, w tym przede wszystkim użytkowanych wewnątrz organizacji systemów informatycznych, może być także wspierany przez zrobotyzowaną automatyzację procesów (ang. RPA - Robotic Process Automation). RPA pojawiło się na początku XXI wieku, jako odpowiedź na rosnącą potrzebę efektywnej automatyzacji rutynowych, czasochłonnych zadań w organizacjach (Moreira i in., 2023). RPA wykorzystuje oprogramowanie do naśladowania działań wykonywanych przez ludzi w różnych systemach komputerowych, takich jak wprowadzanie danych czy generowanie raportów. Głównym celem RPA jest zwiększenie wydajności operacyjnej oraz redukcja błędów i kosztów związanych z manualnym przetwarzaniem danych (Siderska, 2020). Dzięki zastosowaniu inteligentnych agentów (botów), RPA minimalizuje błędy operacyjne i przyspiesza realizację powtarzalnych procesów (Ng i in., 2021). Z kolei integracja RPA i sztucznej inteligencji podnosi efektywność operacyjną w organizacji, zwłaszcza w kontekście ekstrakcji danych, klasyfikacji, prognozowania czy też usprawniania procesów (Ribeiro i in., 2021). Sztuczna inteligencja rozszerza możliwości RPA poprzez integrację zaawansowanych technik analizy danych, takich jak uczenie maszynowe czy rozpoznawanie wzorców (Siderska i in., 2023). AI wzbogaca funkcjonalność RPA, pozwalając na analizę i interpretację złożonych zbiorów danych oraz podejmowanie bardziej złożonych decyzji, co umożliwia adaptację do dynamicznych warunków operacyjnych. W rezultacie integracja AI z RPA prowadzi do tworzenia systemów, które są zdolne do przetwarzania nowych informacji w czasie rzeczywistym, co znacznie zwiększa precyzję oraz skuteczność procesów podlegających automatyzacji.

W miarę rozwoju technologii cyfrowych, przedsiębiorstwa oraz organizacje coraz częściej przechodzą na bardziej zaawansowane formy automatyzacji, takie jak inteligentna automatyzacja procesów (ang. IPA - Intelligent Process Automation). IPA stanowi zaawansowaną formę RPA, która łączy technologie AI i automatyzację w sposób komplementarny (Asadov, 2023). IPA integruje technologie kognitywne oraz uczenie maszynowe, umożliwiając realizację bardziej skomplikowanych zadań, które wykraczają poza prostą automatyzację rutynowych czynności. Systemy IPA potrafią analizować dane, identyfikować wzorce oraz optymalizować procesy w sposób bardziej dynamiczny i inteligentny (Berruti i in., 2017). Dzięki tej zaawansowanej integracji IPA umożliwia efektywne zarządzanie złożonymi procesami biznesowymi i adaptację do szybko zmieniającego się środowiska rynkowego, co jest istotne dla osiągnięcia celów Przemysłowej Rewolucji 5.0. Przejście od RPA do IPA wymaga jednak zapewnienia wysokiej jakości danych, ponieważ błędy w danych mogą prowadzić do obniżenia efektywności modeli uczenia maszynowego i ograniczać skuteczność systemów IPA (Chakraborti i in., 2020).

Efektywna współpraca między ludźmi, a systemami IPA, skoncentrowana na wspieraniu, a nie zastępowaniu pracowników jest niezmiernie ważna przy wdrażaniu, a dalej usprawnianiu inteligentnej automatyzacji procesów.

Integracja technologii Przemysłu 4.0, Przemysłu 5.0, obejmujących, m.in. cyfrowego bliźniaka oraz inteligentną robotyzację i automatyzację procesów, rewolucjonizuje inżynierię sterowania produkcją oraz samą produkcję. Innowacje te wspólnie przyczyniają się do tworzenia inteligentnych, wydajnych i zrównoważonych systemów produkcyjnych, które są na tyle elastyczne, aby sprostać dynamicznym wymaganiom rynku. Skuteczne wdrożenie tych zaawansowanych technologii wymaga strategicznego podejścia, które uwzględnia zarówno czynniki technologiczne jak i ludzkie. Podczas gdy automatyzacja i sztuczna inteligencja mogą znacznie zwiększyć efektywność i produktywność, rola pracowników cały czas pozostanie kluczowa. Przemysł 5.0 w szczególności podkreśla znaczenie współpracy człowieka z maszyną, gdzie można wykorzystać unikalne mocne strony obu stron, aby osiągnąć lepsze wyniki. Integracja zaawansowanych technologii w celu osiągnięcia bardziej złożonego i wszechstronnego poziomu automatyzacji z uwzględnieniem eksperckiej wiedzy człowieka, kryje się z kolei pod pojęciem hiperautomatyzacji. Koncepcja ta obejmuje nie tylko inteligentną automatyzację procesów, ale również technologie takie jak m.in. uczenie maszynowe czy analiza danych (<https://www.oracle.com/pl/cloud/hyperautomation/>, 2024). Wdrażanie tego typu zaawansowanych technologii napędza znaczące postępy w adaptacyjnych systemach sterowania. Adaptacyjne sterowanie produkcją staje się zatem niezbędnym elementem takiego środowiska produkcyjnego. Wykorzystując dane w czasie rzeczywistym i zaawansowaną analizę, cyfrowe bliźniaki oraz inteligentna automatyzacja procesów, umożliwiają dynamiczne dostosowanie procesów produkcyjnych i biznesowych, zwiększając elastyczność i reaktywność na zmiany w popycie lub warunkach operacyjnych. Daje to możliwość budowy bardziej zwinnych i odpornych, adaptacyjnych systemów produkcyjnych, które lepiej radzą sobie ze złożonością i niepewnością w środowisku przemysłowym, niż tradycyjne systemy opierające się wyłącznie na analizie i decyzjach podejmowanych przez człowieka.

## **2.2. Adaptacyjne sterowanie procesem produkcji**

### **2.2.1. Definicja i cele adaptacyjnego sterowania procesem produkcji - wspomaganie podejmowania decyzji w obszarze sterowania produkcją**

W inżynierii, sam termin „adaptacja” odnosi się do zdolności systemów, procesów, struktur, materiałów lub urządzeń do dostosowywania się do zmieniających się warunków operacyjnych, środowiskowych lub wymagań użytkownika. Adaptacja w tym przypadku polega na wprowadzaniu zmian lub modyfikacji w odpowiedzi na nowe lub nieprzewidziane sytuacje, w celu utrzymania lub poprawy funkcjonalności, efektywności, wydajności i niezawodności systemu. Biorąc pod uwagę z kolei system produkcyjny, adaptacja oznacza zdolność do elastycznego reagowania na zmiany w środowisku zewnętrznym lub wewnętrznym, poprzez dostosowywanie się do nowych warunków, usprawnienie procesów oraz minimalizację strat.

Rozpatrując pojęcie adaptacyjnego sterowania procesem produkcji w szerszym spojrzeniu, to strategia zarządzania, która dostosowuje się do zmieniających się warunków i potrzeb produkcyjnych w czasie rzeczywistym. Natomiast w bardziej wąskim podejściu, adaptacyjne sterowanie procesem produkcji to podejście oparte na zdolności systemów produkcyjnych do dynamicznego reagowania na zmieniające się warunki otoczenia. W kontekście takiego wąskiego podejścia, proces produkcyjny definiowany jest jako sekwencja zadań i operacji, które przekształcają surowce lub komponenty w gotowe produkty lub usługi. Sterowanie z kolei, jak przedstawiono wcześniej, to proces podejmowania decyzji i wykonywania działań mających na celu kontrolę i regulację przebiegu procesu produkcyjnego w celu osiągnięcia zamierzonych celów wydajnościowych, jakościowych i ekonomicznych. Oparcie zatem procesu decyzyjnego o metody wspomagania decyzji, algorytmy decyzyjne czy modele decyzyjne jest krokiem w kierunku adaptacyjnego sterowania procesem produkcji. Celem adaptacyjnego sterowania produkcją jest dostosowywanie się procesów produkcyjnych do zmieniających się warunków w sposób, który zapewnia zachowanie najbardziej odpowiednich parametrów procesu (Denkena & Morke, 2017). W praktyce, adaptacyjne sterowanie produkcją wykorzystuje zaawansowane technologie, takie jak algorytmy uczenia maszynowego, sztuczna inteligencja oraz analiza danych w czasie rzeczywistym. Systemy te mogą zbierać dane z różnych źródeł, takich jak czujniki, urządzenia IoT oraz systemy monitorowania, a następnie analizować je w celu wykrywania wzorców, prognozowania przyszłych zdarzeń, wspomagania podejmowania decyzji, a w bardziej zaawansowanych rozwiązaniach podejmować decyzje samodzielnie (Panzer & Gronau, 2023) (Nielsen i in., 2023). Przykładowe metody adaptacyjnego sterowania procesem produkcji obejmują dynamiczne dostosowywanie parametrów produkcji, zmianę sekwencji zadań produkcyjnych w zależności od aktualnych potrzeb oraz automatyczne rekonfigurowanie linii produkcyjnych w przypadku awarii lub zmiany produktu (Denkena i in., 2019). Kolejnym celem takiego podejścia jest zwiększenie efektywności, co przejawia się w zwiększonej wydajności, ograniczeniu poziomu wyrobów brakowych oraz bardziej korzystnym wykorzystaniu zasobów. Adaptacyjne sterowanie procesem produkcji, umożliwia uzyskanie korzyści przedsiębiorstwu, dzięki skoncentrowaniu się zarówno na monitorowaniu, jak i dostosowywaniu procesów produkcyjnych, tak aby możliwe było dynamiczne reagowanie na zmieniające się warunki otoczenia. Według autora pracy, efektywne wprowadzenie adaptacyjnego sterowania procesem produkcji wymaga w związku z tym przede wszystkim:

- skutecznego pozyskiwania danych oraz ich analizy, skutkującej odkrywaniem nowej wiedzy,
- poprawnego doboru metody oceny stanu procesu produkcji, uwzględniającego specyfikę badanego procesu,
- rozpatrzenia możliwości skorzystania ze sztucznej inteligencji w celu usprawnienia procesów decyzyjnych,
- zastosowania technologii cyfrowych, spinających poszczególne elementy systemu w jeden sprawnie działający system informatyczny,
- skutecznej walidacji opracowanego rozwiązania, np. z wykorzystaniem kluczowych wskaźników efektywności do badania osiągnięcia założonych celów produkcyjnych.

### 2.2.2. Pozyskiwanie danych oraz odkrywanie wiedzy

Obszar pozyskiwania danych i odkrywania wiedzy stał się niezwykle istotny w świecie opartym na danych. W miarę jak przedsiębiorstwa w różnych branżach gromadzą ogromne ich ilości, wyzwanie polega nie tylko na ich przechowywaniu i zarządzaniu nimi, ale także na wydobywaniu z nich znaczących informacji. Pozyskiwanie danych (ang. data mining) odnosi się do procesu analizy dużych zbiorów danych w celu identyfikacji wzorców, trendów i relacji, które mogłyby inaczej pozostać ukryte. Odkrywanie wiedzy (ang. knowledge discovery) obejmuje szersze spektrum działań związanych z wydobywaniem wartościowych informacji z danych i przekształcaniem ich w użyteczną wiedzę. Spośród licznych oraz stale pojawiających się nowych zastosowań, do głównych obszarów wykorzystania metod data mining w obszarze produkcji zalicza się (K. J. Cios i in., 2007) (Larose, 2008):

- odkrywanie wzorców (ang. pattern discovery) - techniki eksploracji danych są wykorzystywane do odkrywania wzorców i trendów w danych, które mogą nie być od razu widoczne. Obejmuje to identyfikację powiązań między różnymi zmiennymi, sekwencji zdarzeń lub często występujących wzorców, które mogą dostarczyć cennych informacji do podejmowania decyzji,
- prognozowanie i klasyfikację - analizując historyczne dane przechowywane w bazach danych, eksploracja danych umożliwia modelowanie predykcyjne oraz zadania klasyfikacyjne. Modele predykcyjne wykorzystują algorytmy do prognozowania przyszłych trendów lub wyników na podstawie historycznych wzorców, podczas gdy techniki klasyfikacyjne przypisują nowe punkty danych do wcześniej zdefiniowanych kategorii lub klas na podstawie obserwacji z przeszłości,
- segmentację i grupowanie - metody eksploracji danych są wykorzystywane do segmentacji zbiorów danych na znaczące grupy lub klastry na podstawie podobieństw w cechach lub zachowaniach. Pomaga to w identyfikacji odrębnych segmentów klientów, segmentów rynku lub anomalii w danych,
- usprawnianie - metody eksploracji danych przyczyniają się do usprawniania procesów i operacji w przedsiębiorstwach poprzez identyfikację nieefektywności, wąskich gardeł lub obszarów wymagających poprawy. Może to prowadzić do lepszego alokowania zasobów, redukcji kosztów i poprawy ogólnej wydajności.

Proces odkrywania wiedzy jest z kolei dynamiczny, silnie interaktywny i w pełni możliwy do zwizualizowania. Jego główne cele to (K. Cios i in., 1998):

- rozpoznawać interesujące zdarzenia i trendy,
- wspierać proces podejmowania decyzji,
- wydobywać przydatne raporty,
- wykorzystać dane do osiągnięcia celów naukowych, biznesowych lub operacyjnych.

Pozyskiwanie danych i odkrywanie wiedzy są z natury interdyscyplinarne, czerpiąc z takich dziedzin jak statystyka, uczenie maszynowe, zarządzanie bazami danych i sztuczna

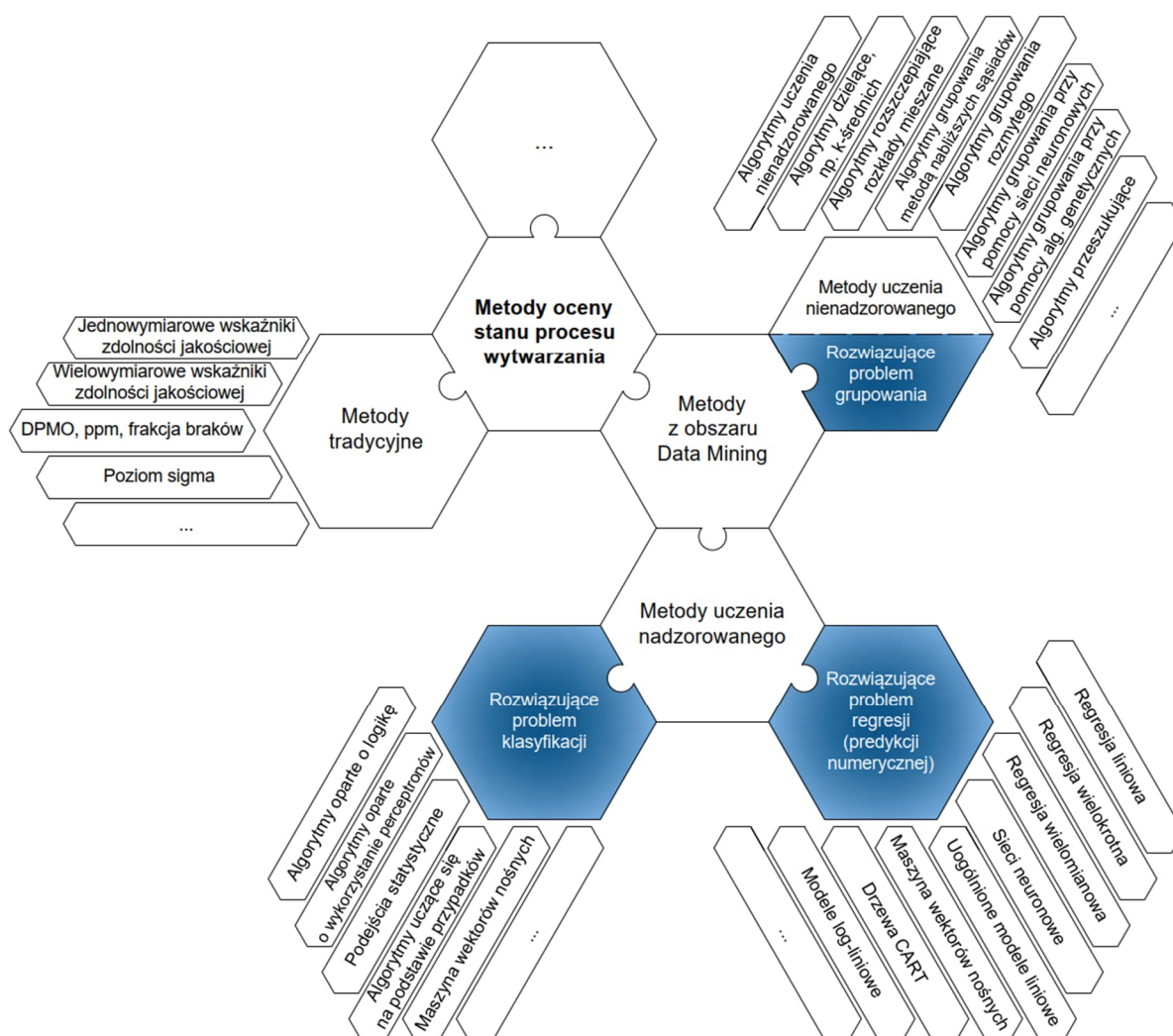
inteligencja. Techniki te umożliwiają przedsiębiorstwom wykorzystanie mocy swoich danych do wspierania podejmowania decyzji, usprawniania procesów i zdobywania przewagi konkurencyjnej. Dzięki wykorzystaniu zaawansowanych algorytmów i metod analitycznych, pozyskiwanie danych może odkrywać ukryte wzorce, które informują o planowaniu strategicznym i usprawnieniach operacyjnych. Integracja tych metodologii z bazami danych pozwala na systematyczne badanie i analizowanie danych strukturalnych. Ta integracja jest kluczowa z kilku powodów: zwiększa efektywność przetwarzania danych, zapewnia spójność i dokładność uzyskanych informacji oraz ułatwia wizualizację złożonych relacji danych.

### **2.2.3. Metody oceny stanu procesu produkcji**

Tradycyjne metody, takie jak wskaźniki zdolności procesu, od dawna są stosowane do monitorowania zmienności procesów i zapewnienia standardów jakości. Metody te opierają się na danych historycznych i obliczeniach statystycznych, aby dostarczyć podstawowego zrozumienia zachowania procesów. Jednak wraz z nadejściem Big data i zaawansowanych technologii obliczeniowych pojawiły się bardziej wyrafinowane podejścia takie jak techniki eksploracji danych, które zrewolucjonizowały sposób przeprowadzania oceny stanu procesów. Metody te wykorzystują analitykę danych, uczenie maszynowe oraz monitorowanie w czasie rzeczywistym, jak przykładowo w opisaney wcześniej inteligentnej automatyzacji procesów. Dzięki analizie dużych zbiorów danych i odkrywaniu ukrytych wzorców i relacji, metody eksploracji danych umożliwiają bardziej szczegółowe i proaktywne podejście do monitorowania procesów. Techniki te ułatwiają automatyczne wykrywanie anomalii, przewidywanie przyszłych trendów oraz klasyfikację stanów procesów, co w efekcie poprawia podejmowanie decyzji i planowanie strategiczne.

Nowoczesne metody oceny procesów produkcyjnych oferują szereg korzyści, w tym pogłębioną analizę oraz większą dokładność w czasie rzeczywistym. Jednakże wymagają one niejednokrotnie znaczących inwestycji w infrastrukturę danych i ekspertyzy z zakresu nauki o danych. Integrując z kolei tradycyjne i nowoczesne metody, przedsiębiorstwa mogą zbudować kompleksowy ramowy system oceny, który wykorzystuje mocne strony obu podejść. Takie holistyczne podejście zapewnia, że ocena procesu jest dokładna, adaptacyjna i zdolna do radzenia sobie z złożonościami i wymaganiami współczesnego środowiska produkcyjnego.

Ocena stanu procesu produkcyjnego odnosi się do bieżącego statusu wszystkich działań i operacji związanych z produkcją wyrobów w przedsiębiorstwie. Obejmuje czynniki takie jak postęp zamówień produkcyjnych, dostępność zasobów, przestrzeganie harmonogramów, jakość wyjściowa oraz ogólna efektywność. Polega na analizie różnych parametrów i wskaźników w celu określenia kondycji procesu, jego stabilności oraz obszarów wymagających potencjalnej poprawy. Taka ocena jest niezbędna do identyfikacji nieefektywności, wykrywania anomalii oraz wdrażania działań korygujących, które mogą prowadzić do zwiększenia produktywności i obniżenia kosztów operacyjnych. Klasyfikacja metod oceny stanu procesu wytwarzania ukazuje kompleksowy przegląd różnych technik i podejść stosowanych do monitorowania i oceny kondycji procesów produkcyjnych (Han i in., 2012) (Kantardzic, 2011). Metody te obejmują zarówno tradycyjne techniki statystyczne, jak i zaawansowane algorytmy eksploracji danych i uczenia maszynowego, co przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2 Klasyfikacja metod oceny stanu procesu wytwarzania – opracowanie własne na podstawie (Rogalewicz i in., 2012)

Każda z przedstawionych metod oferuje unikalną ścieżkę postępowania, co sprawia, że ważne jest zrozumienie ich zastosowań, mocnych stron i ograniczeń, tak aby skutecznie wybrać odpowiednią metodą do próby rozwiązania analizowanego problemu. Wybór odpowiedniej metody powinien uwzględniać także specyfikę danego procesu produkcji ze szczególnym naciskiem na ilość, jakość i czas pozyskiwanych danych i informacji. Budując system oparty o adaptacyjne sterowanie, nieodzownym jest oprogramowanie algorytmów wykorzystywanych w zaimplementowanych metodach oceny stanu procesu, tak aby maksymalnie skrócić czas pomiędzy akwizycją danych, a otrzymaniem wyników końcowych, z gwarancją powtarzalności obliczeń i jak największą ich wiarygodnością, w czym pomocne mogą być rozwiązania wykorzystujące sztuczną inteligencję.

#### 2.2.4. Sztuczna inteligencja w procesie sterowania produkcją

Postęp technologiczny jaki dokonał się w ciągu ostatnich kilku lat sprawił, że sztuczna inteligencja znalazła się na czołowym miejscu, jeżeli chodzi o rozpoznanie możliwości jej zastosowania oraz skuteczne jej wdrożenia w wielu branżach, w tym w produkcji, logistyce i zarządzaniu łańcuchem dostaw. AI obejmuje szereg technologii zaprojektowanych do

symulacji ludzkiej inteligencji, co umożliwia maszynom uczenie się na podstawie doświadczeń, adaptowanie się do nowych danych i wykonywanie zadań podobnych do ludzkich. Jej potencjalnie szerokie i zróżnicowane obszary zastosowania, niektóre z pewnością jeszcze nie odkryte, rewolucjonizują sposób działania przemysłu, zwiększając efektywność i napędzając innowacje (Rutkowski, 2012) (Russell & Norvig, 2021).

W dzisiejszym przemyśle AI nie jest już tylko futurystycznym konceptem, ale staje się niezbędnym elementem bieżącej działalności, który przyczynia się do wzrostu konkurencyjności i zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw (Perrault & Clark, 2024). Systemy AI mogą analizować ogromne ilości danych z niespotykaną dotąd prędkością, odkrywać wzorce i wnioski, których ludzie nie byłoby w stanie wykryć oraz podejmować decyzje usprawniające wykonywane operacje. W rozwijającym się środowisku produkcyjnym wspieranym procesami cyfryzacji i informatyzacji nie jest problemem gromadzenie danych, ale wyzwaniem pozostaje ich analiza umożliwiająca budowanie skutecznych metod i narzędzi wspomagających procesy biznesowe. Od predykcyjnego utrzymania ruchu i kontroli jakości po zautomatyzowane linie produkcyjne i inteligentną logistykę, AI przekształca każdy aspekt działalności przemysłowej na nowo redefiniując warunki prowadzenia biznesu (Rojek i in., 2023) (Sundaram & Zeid, 2023).

Sztuczna inteligencja jest gałęzią informatyki, której celem jest tworzenie systemów zdolnych do wykonywania zadań, które normalnie wymagają ludzkiej inteligencji. Do tych zadań należą uczenie się, rozumowanie, rozwiązywanie problemów, percepcja oraz rozumienie języka (Warwick, 2013). Jednym z głównych obszarów zastosowania AI w przedsiębiorstwach jest automatyzacja procesów produkcyjnych. Systemy AI mogą kontrolować i usprawniać maszyny, roboty i linie produkcyjne, co prowadzi do zwiększenia efektywności, redukcji kosztów i minimalizacji błędów ludzkich. Przykładem jest zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych telemetrycznych z maszyn i urządzeń, co pozwala na wczesne wykrywanie usterek i planowanie czynności obsługowych przed awariami. AI odgrywa także niebagatelną rolę w zarządzaniu jakością w produkcji. Za pomocą systemów opartych na uczeniu maszynowym można analizować dane dotyczące jakości produkowanych wyrobów, wykrywać defekty i identyfikować przyczyny problemów jakościowych. Dzięki temu przedsiębiorstwa mogą szybko reagować na problemy i podejmować działania naprawcze, co przekłada się na poprawę jakości końcowych produktów. Kolejnym istotnym zastosowaniem AI w przedsiębiorstwach produkcyjnych jest planowanie produkcji i zarządzanie zapasami (González Rodríguez i in., 2020) (Esteso i in., 2023). Systemy AI mogą analizować dane dotyczące popytu, prognozować sprzedaż i usprawniać plany produkcyjne oraz zarządzanie zapasami surowców i gotowych produktów. Wykorzystanie takich funkcjonalności zaimplementowanych w systemach wykorzystujących AI, umożliwia przedsiębiorstwom minimalizować ryzyko nadmiernych zapasów i braków oraz skutecznie dostosować wykorzystanie zasobów produkcyjnych (Kayode Olajiga i in., 2024).

Implementacja sztucznej inteligencji w procesie sterowania produkcją niesie za sobą zarówno wyzwania, jak i obiecujące perspektywy na przyszłość (Hashmi i in., 2022). Głównym wyzwaniem jest zapewnienie dostępu do dużej ilości wysokiej jakości, które są niezbędne do skutecznego funkcjonowania algorytmów AI. Integracja danych z różnych źródeł, takich jak

systemy informatyczne (ERP, MES), IoT czy różnego rodzaju czujniki i sensory, może być długotrwała i kosztowna oraz wymaga zaawansowanych rozwiązań integracyjnych. Projektowanie systemów AI, które są skalowalne i mogą działać w czasie rzeczywistym, stawia przed przedsiębiorstwami kolejne wyzwania technologiczne i organizacyjne. Niemniej ważne jest zapewnienie poprawnej interpretacji decyzji podejmowanych przez algorytmy AI, szczególnie w kontekście regulacji i odpowiedzialności prawnej (Berente i in., 2021). Ponadto, niezbędne jest przekwalifikowanie personelu do pracy z nowoczesnymi technologiami AI, co wymaga inwestycji w szkolenia i rozwój kompetencji posiadanej kadry pracowników (Jiang i in., 2022).

Wdrożenie systemów AI opartych na algorytmach uczenia maszynowego do adaptacyjnego sterowania w procesach produkcyjnych, oferuje możliwość podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym oraz szerokiego usprawniania wykonywanych w przedsiębiorstwie procesów (Usuga Cadavid i in., 2020). Sieci neuronowe, jako podstawowy element uczenia maszynowego, doskonale radzą sobie z nauką skomplikowanych wzorców i relacji z danych, co czyni je odpowiednimi do zadań związanych z utrzymaniem predykcyjnym, kontrolą jakości oraz zwiększaniem sprawności procesów. Drzewa decyzyjne zapewniają przejrzystość podejmowania decyzji poprzez mapowanie logicznych decyzji na podstawie zmiennych wejściowych, co jest przydatne w wykrywaniu usterek i ich klasyfikacji w środowisku produkcyjnym. Algorytmy grupowania z kolei, dzielą dane na grupy na podstawie podobieństw, ułatwiając wykrywanie anomalii i alokację zasobów w dynamicznie zmiennym otoczeniu produkcyjnym. Wspólnie te algorytmy zwiększają możliwości systemów adaptacyjnego sterowania, ciągle ucząc się na podstawie pozyskanych danych, poprawiając efektywność, zmniejszając przestoje i usprawniając wyniki produkcji. Ich integracja ze środowiskiem produkcyjnym wspiera praktyki adaptacyjnego sterowania produkcją, dopasowując procesy produkcyjne do wymagań i zmienności w czasie rzeczywistym, zwiększając tym samym ogólną sprawność operacyjną wydziału produkcji.

Zastosowanie rozwiązań opartych na sztucznej inteligencji jest kolejnym naturalnym krokiem w rozwoju adaptacyjnych systemów sterowania produkcją. Osoby decyzyjne w przedsiębiorstwie mogą wykorzystywać analizy oparte na AI do wsparcia w podejmowaniu decyzji zarządczych, dzięki otrzymaniu użytecznych informacji ze złożonych zestawów danych. Co więcej, narzędzia zasilane AI mogą wspierać operatorów w czasie rzeczywistym, automatyzować powtarzalne zadania i pozwalać pracownikom skupić się na bardziej strategicznych działaniach. Ta synergia między ludzką inteligencją, a AI pozwala tworzyć innowacyjne i mogące sprawnie adaptować się do zmieniających się warunków środowisko produkcyjne. AI wspiera integrację zasad Przemysłu 4.0 i Przemysłu 5.0 poprzez łączenie i harmonizowanie różnych technologii w ekosystemie produkcyjnym, co jest szczególnie ważne w zróżnicowanych środowiskach produkcyjnych. AI wspiera działania jako centralna inteligencja, która organizuje płynne interakcje, tworząc inteligentny, połączony i wysoce adaptacyjny system produkcyjny.

## 2.3. Technologie cyfrowe wspierające sterowanie procesem produkcji – rola systemów MES (ang. Manufacturing Execution System)

Cyfryzacja gospodarki i społeczeństwa jest jedną z najbardziej dynamicznych zmian naszych czasów, która otwiera nowe możliwości w tworzeniu modeli biznesowych, a zarazem niesie ze sobą niepewność oraz różnego rodzaju zagrożenia związane, m.in. ze społecznymi skutkami automatyzacji procesów wytwórczych czy szeroko rozumianym bezpieczeństwem (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2019). Cyfryzacja jako ciągły proces konwergencji rzeczywistego i wirtualnego świata staje się głównym motorem innowacji i zmian w większości sektorów gospodarki (Naqshbandi & Jasimuddin, 2022) (Suszyński i in., 2022). Cyfryzacja może być rozumiana na wiele sposobów, a w odniesieniu do procesów produkcyjnych to pozyskanie cyfrowej postaci obiektu związane z tworzeniem różnego rodzaju metadanych, a także z gromadzeniem, strukturyzowaniem, przetwarzaniem, archiwizowaniem, zarządzaniem, wymianą, ochroną i udostępnianiem materiałów i danych. Cyfryzacji podlegają nie tylko procesy komunikacji, ale coraz częściej procesy produkcyjne, usługowe oraz te związane z zarządzaniem przedsiębiorstwem (Reuter i in., 2017) (Lu i in., 2020). W rezultacie, przedsiębiorstwa w swojej działalności opierają się na systemach informatycznych przesyłających, gromadzących i przetwarzających coraz większe ilości danych (Curry i in., 2022). Cyfryzacja przynosi przedsiębiorstwom wiele korzyści, wynikających przede wszystkim z usprawnienia procesów gospodarczych, zwiększenia efektywności komunikacji oraz zmniejszenia liczby błędów we wszystkich procesach opierających się na analizie danych (Cerquitelli i in., 2021) (Attaran & Celik, 2023).

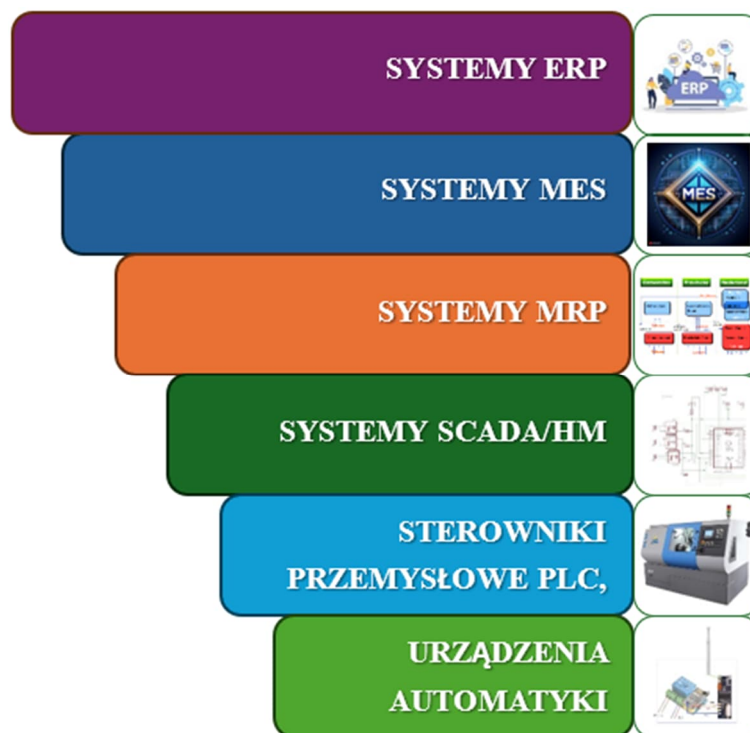
Każde przedsiębiorstwo produkcyjne chcące pozostać konkurencyjnym, w swojej codziennej pracy przeznacza dużą ilość posiadanych zasobów starając się maksymalnie upraszczać i skracać swój proces produkcyjny. Z drugiej strony, jak w przypadku FAS, szybkie i precyzyjne wykonanie skomplikowanych wyrobów, wymaga posiadania co raz to bardziej zaawansowanego technologicznie parku maszynowego, którego obsługa i nadzór wymaga wysokich kwalifikacji. Skuteczne sterowanie złożonymi procesami produkcyjnymi uwzględniające poza parkiem maszynowym, pozostałe wymagane zasoby, dane i informacje, wymaga w takim przypadku zaawansowanych systemów informatycznych, tak aby zapewnić wymaganą skuteczność i wesprzeć decydentów w podejmowaniu bieżących decyzji.

Systemy informatyczne wspierające sterowanie procesem produkcyjnym obejmują szereg różnorodnych rozwiązań, z których niektóre są dedykowane do konkretnych zastosowań, podczas gdy inne są bardziej ogólnymi platformami wspierającymi zarządzanie i sterowanie produkcją. Do najważniejszych systemów możemy zaliczyć (Mantravadi & Møller, 2019) (Pallagani i in., 2024) (Leonne i in., 2024):

- Manufacturing Execution Systems (MES),
- Enterprise Resource Planning (ERP),
- Advanced Planning and Scheduling (APS),
- Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA),
- Product Lifecycle Management (PLM),

- Quality Management Systems (QMS),
- Warehouse Management Systems (WMS).

Integracja informatyczna tych systemów pozwala na dokładną ocenę sytuacji w jakiej znajduje się przedsiębiorstwo i co za tym idzie, umożliwia podejmowanie właściwych decyzji zarządczych. Na niższych poziomach przedsiębiorstwa produkcyjnego od wielu lat są stosowane nadrzędne systemy sterowania i akwizycji danych SCADA, przemysłowe układy sterowania CNC (Computer Numerical Control), PLC (Programmable Logic Controller), IPC (Industrial PC), czujniki, elementy wykonawcze i inne urządzenia automatyki przemysłowej. Stanowią one swoisty system informatyczny działający w czasie rzeczywistym, którego podstawowym zadaniem jest sterowanie maszynami i liniami produkcyjnymi w celu realizacji zadań produkcyjnych. Ważną pozycję w hierarchii systemów informatycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym zajmuje system MES, co przedstawiono na rysunku 2.3.



Rys. 2.3 Hierarchia systemów informatycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Podstawowym zadaniem systemu MES jest efektywne i skuteczne prowadzenie procesu produkcyjnego na podstawie precyzyjnych i aktualnych danych produkcyjnych pochodzących z układów sterowania i systemów akwizycji danych. Systemom MES przypisuje się następujące funkcje:

- zbieranie i archiwizacja danych produkcyjnych,
- monitorowanie i kontrolowanie przebiegu procesu wytwórczego,
- harmonogramowanie zadań produkcyjnych,
- zarządzanie zasobami (maszynami, pracownikami) oraz ich alokacja,
- zarządzanie przeglądami i remontami maszyn i linii produkcyjnych,
- analizowanie efektywności produkcji i generowanie raportów,
- zarządzanie jakością i wiele innych.

Niezbędnym elementem nowoczesnego systemu MES jest możliwość łatwej integracji z systemami automatyki przemysłowej (sterowniki, SCADA) oraz z bazami danych, które przechowują dane produkcyjne istotne dla procesu podejmowania decyzji. Systemy MES łączą sterowanie wydziałem produkcyjnym, działem utrzymania ruchu, działem jakości i inne źródła danych w jednolity system informatyczny, używając standardowych komponentów oprogramowania takich jak: OPC Client, OPC Server i ActiveX. Te nowoczesne technologie informatyczne w znaczny sposób redukują całkowity koszt integracji MES z systemami automatyki i bazami danych oraz zabezpieczają inwestycje IT na przyszłość. Jednakże projektowanie systemu komunikacyjnego nie jest zadaniem łatwym i wymaga uwzględnienia wielu parametrów technicznych sieci i protokołów komunikacyjnych, interfejsów łączących systemy informatyczne, a także uwzględnienia wymagań czasowych, bezpieczeństwa transmisji danych i ograniczeń wynikających z przepustowości sieci i wymagań technicznych przedsiębiorstwa.

Wprowadzenie nowoczesnych systemów IT do kontrolowania procesów produkcyjnych przyniosło daleko idące zmiany w sposobie zarządzania i monitorowania produkcji. Systemy te umożliwiają pełną widoczność i śledzenie operacji produkcyjnych, co przyspiesza reakcję osób odpowiedzialnych za proces na występujące zmiany i anomalie. Głównym elementem tych systemów są systemy MES, które pełnią rolę integratora między poziomem operacyjnym, a zarządzającym. Dzięki nim możliwe jest zarządzanie zadaniami, zasobami, jakością oraz śledzenie postępu produkcji w czasie rzeczywistym. Systemy MES oferują szeroki zakres funkcji, od planowania produkcji i zarządzania zasobami, po kontrolę jakości i zarządzanie działaniami obsługowymi. Stają się one niezbędne do zapewnienia spójności i skuteczności procesów produkcyjnych oraz do eliminacji niepotrzebnych przestojów i redukcji kosztów. Integracja systemów MES z innymi systemami IT oraz urządzeniami przemysłowymi umożliwia automatyzację, zbieranie danych oraz ich analizę on-line, co wspiera podejmowanie decyzji na wszystkich poziomach zarządzania. Wdrożenie i użytkowanie systemu MES przynosi zarówno liczne korzyści, jak i stawia przed przedsiębiorstwami pewne wyzwania. Jedną z głównych korzyści jest poprawa efektywności produkcyjnej dzięki usprawnionemu planowaniu produkcji, redukcji przestojów oraz lepszemu wykorzystaniu zasobów. Integracja MES z innymi systemami informatycznymi, takimi jak ERP, SCADA czy APS umożliwia pełniejsze zarządzanie operacjami produkcyjnymi oraz lepszą wymianę danych na różnych poziomach organizacji.

Mimo licznych korzyści, wdrożenie MES może napotkać wiele wyzwań. Złożoność techniczna i organizacyjna implementacji, integracja z istniejącymi systemami, wysokie koszty zakupu i utrzymania systemu oraz konieczność przeszkolenia pracowników są głównymi trudnościami, które przedsiębiorstwa muszą przezwyciężyć. Ponadto, bezpieczeństwo danych i odpowiednie zarządzanie ryzykiem stają się najbardziej istotnymi kwestiami przy implementacji MES, zwłaszcza w kontekście gromadzenia i przetwarzania dużych ilości wrażliwych danych produkcyjnych. Zasadniczym elementem sukcesu wdrożenia MES jest odpowiednie przygotowanie, planowanie i zarządzanie wdrożeniem. Przedsiębiorstwa muszą starannie rozważyć swoje potrzeby funkcjonalne, dostosować system do specyficznych wymagań produkcji oraz zapewnić odpowiednie wsparcie techniczne i szkolenia dla personelu. Pomimo wyzwań, właściwie wdrożony system MES może znacząco zwiększyć

konkurencyjność przedsiębiorstwa poprzez poprawę efektywności, jakości i elastyczności produkcji.

Systemy MES są zaprojektowane do monitorowania, śledzenia i kontrolowania operacji produkcyjnych w czasie rzeczywistym. Służą jako pomost pomiędzy systemami planowania zasobów przedsiębiorstwa (ERP), a wydziałem produkcyjnym, zapewniając płynny przepływ informacji. Dostarczają szczegółowych danych dotyczących działań produkcyjnych, w tym wydajności maszyn, produktywności pracy oraz zużycia materiałów. Zastosowanie tego typu systemów w bieżącej działalności każdego przedsiębiorstwa, również w FAS, jest niezbędnym warunkiem do skutecznego wdrożenia adaptacyjnego sterowania procesem produkcji.

## **2.4. Pomiar i ocena postępów w osiągnięciu kluczowych celów sterowania produkcją**

### **2.4.1. Cechy wskaźników efektywności**

Jednym z najważniejszych narzędzi umożliwiających monitorowanie przebiegu procesu produkcji są kluczowe wskaźniki efektywności. Są one wykorzystywane do pomiaru i oceny istotnych pod względem ekonomicznym, jakościowym, wydajnościowym i organizacyjnym parametrów charakteryzujących funkcjonowanie przedsiębiorstwa. Wskaźniki umożliwiają dynamiczną ingerencję w proces sterowania produkcją poprzez sygnalizowanie odchyleń od zaplanowanych wartości. Ich specyficzne cechy pozwoliły na walidację systemu do adaptacyjnego sterowania produkcją w FAS. Ważnym aspektem z punktu widzenia efektywności zarządzania poprzez wskaźniki KPI jest właściwa identyfikacja newralgicznych obszarów w procesie sterowania produkcją, dla których w dalszym etapie opracowuje się kluczowe wskaźniki efektywności odzwierciedlające wydajność i jakość procesu oraz umożliwiające skuteczny pomiar i ocenę realizowanych celów. Ze względu na złożoność i wieloobszarowość procesu sterowania produkcją w FAS, podstawowym aspektem jego sprawnego funkcjonowania była budowa zintegrowanego hierarchicznego systemu wspomagania podejmowania decyzji zarządczych. Opracowanie i wdrożenie efektywnego adaptacyjnego systemu sterowania opartego na wskaźnikach KPI wymagało w takim przypadku szerokiej cyfryzacji procesów biznesowych w przedsiębiorstwie.

Współczesne systemy produkcyjne integrują zaawansowane rozwiązania mechaniczne, elektroniczne oraz informatyczne (Gola, 2021). Złożoność tych systemów oznacza, że aby w pełni zrozumieć proces sterowania produkcją na wszystkich poziomach podejmowania decyzji i umożliwić dokonanie właściwej oceny jego stanu, należy skonsolidować wiedzę ze wszystkich dyscyplin inżynierskich (Wohlers i in., 2020). Przy podejmowaniu decyzji istotne jest uzyskanie przydatnych informacji na temat stanu procesu, na podstawie których można efektywnie eliminować lub redukować przyczyny zakłóceń (Piechowski i in., 2018). Pozyskanie takich informacji można osiągnąć poprzez monitorowanie stanu procesu i jego parametrów, tj. jakość, wydajność, efektywność, czasochłonność (Jasiulewicz-Kaczmarek & Saniuk, 2018) (Nikishechkin i in., 2020).

Jak przedstawiono wcześniej, niebagatelne znaczenie w doskonaleniu metod zarządzania ma cyfryzacja procesów produkcyjnych. Właściwie przeprowadzona wpływa w istotny sposób na monitorowanie i kontrolę procesu produkcyjnego poprzez optymalizację jego zasobów, z wykorzystaniem efektywnych metod gromadzenia i przetwarzania informacji. Umożliwia także budowanie inteligentnych systemów zarządzania produkcją oraz tworzenie autonomicznych i adaptacyjnych systemów sterowania produkcją. Zasadniczym aspektem z punktu widzenia celów strategicznych firmy jest zatem właściwa identyfikacja istotnych obszarów w procesie sterowania produkcją. Dla tak zidentyfikowanych obszarów należy opracować narzędzia umożliwiające skuteczną ocenę realizowanych celów.

Jednym z narzędzi wspierających procesy oceny i podejmowania decyzji są wspomniane wskaźniki KPI. Wskaźniki pozwalają na monitorowanie i ocenę stanu procesu w wielu obszarach produkcyjnych i pomocniczych, jak również na wielu poziomach decyzyjnych (Ishaq Bhatti & Awan, 2014). Przenikanie obszarów przedsiębiorstwa i poziomów decyzyjnych umożliwia wyznaczanie zależności pomiędzy poszczególnymi cechami wskaźników oraz agregowanie ich wartości. Zależności pomiędzy charakterystykami różnych wskaźników pozwalają na projektowanie zaawansowanych metod wnioskowania obejmujących różne obszary wpływu na proces produkcyjny (Król i in., 2020) (Kang i in., 2016).

Opracowany dla przedsiębiorstwa model wnioskowania oparty na KPI powinien zawierać kluczowe informacje dla procesów podejmowania decyzji. Informacje przekazywane menedżerom, inżynierom i operatorom muszą być przekazane w czytelny, przejrzysty i zrozumiały sposób. Wskaźniki, o ile to możliwe i uzasadnione, powinny prezentować zarówno wartości bezwzględne, jak i względne. Same wartości bezwzględne nie wskazują na skalę oceny stanu procesu, zaś wartości procentowych nie można agregować. Wskaźniki na poziomie strategicznych celów powinny być wskaźnikami rezultatu, czyli powinny odzwierciedlać zamierzone efekty (Bocewicz i in., 2021). Z kolei na poziomie operacyjnym, oprócz wskaźników rezultatu, należy również zdefiniować wskaźniki produktu, które będą wskazywać na działania prowadzące do osiągnięcia celów (Burduk i in., 2021). Dla tak zdefiniowanych celów konieczne jest zidentyfikowanie odpowiednich wskaźników wspierających proces podejmowania decyzji.

Wskaźniki efektywności są powszechnie używane w przedsiębiorstwach, jednak często są wykorzystywane w ograniczony sposób, tzn. dotyczyć mogą albo wybranych obszarów zarządzania, jak np. utrzymanie ruchu albo być skupione na wybranych pojedynczych wskaźnikach, takich jak OEE. Spośród wielu dostępnych wskaźników KPI istotny jest wybór tych, które umożliwiają osiągnięcie założonych celów.

Skuteczne podejmowanie decyzji związane z procesem produkcji uwarunkowane jest cechami, jakimi powinny charakteryzować się wskaźniki. Zaliczyć do nich można np.:

- istotność,
- dokładność,
- kompletność,
- aktualność,
- stabilność,

- miarodajność,
- prostotę
- elastyczność.

Efektywność tego narzędzia w procesie decyzyjnym, zależy w głównej mierze od tych cech. Odpowiednio dobrze skonstruowane i dobrane KPI zapewniają dokładne informacje, które pomagają w monitorowaniu postępu w realizacji celów, identyfikacji obszarów wymagających poprawy oraz dostosowaniu działań operacyjnych do ogólnych celów biznesowych. Ponadto dokładne i aktualne KPI sprzyjają kulturze odpowiedzialności w przedsiębiorstwie, zapewniając, że wszyscy interesariusze są świadomi swoich wskaźników wydajności oraz zakresu odpowiedzialności za proces.

Jedną z podstawowych cech jest zatem zakres oddziaływania wskaźnika, czyli jego istotność. Każdy model zarządzania ma określone swoje cele strategiczne, które mają istotny wpływ na jego efektywność. W związku z tym konieczne jest dokładne przeanalizowanie aktualnego stanu przedsiębiorstwa, jego ograniczeń i możliwości, aby wyznaczyć jasno zdefiniowany główny cel, do którego będzie dążyć całe przedsiębiorstwo na wszystkich poziomach decyzyjnych. W każdym modelu, kluczowe będą inne wskaźniki związane z:

- osiągnięciem celów przedsiębiorstwa, zarządzania personelem, efektywnością realizowanych zadań,
- jakością świadczonych usług, jakością produkowanych wyrobów, procesem doskonaleniem pracowników, efektywnością procesu, oceną zagrożeń,
- przeciwdziałaniem marnotrawstwa: identyfikacją strat, analizą kosztów oraz efektywności wyposażenia produkcyjnego.

Wykorzystanie danych do osiągania celów strategicznych i operacyjnych przedsiębiorstwa dzięki zastosowaniu kluczowych wskaźników efektywności, umożliwia sformułowanie ram dla systemu pomiaru i zarządzania strategią. Z tego powodu wskaźniki muszą być powiązane z tymi celami, aby podejmowane decyzje były skorelowane na strategiczne cele przedsiębiorstwa. Dla przykładu, dla modelu TPM (ang. Total Productive Maintenance) kluczowym wskaźnikiem jest OEE (ang. Overall Equipment Effectiveness), który odzwierciedla efektywność zarówno całych procesów, jak i pojedynczych stanowisk czy maszyn.

Drugą istotną cechą jest dokładność i precyzja odwzorowania stanu procesu, czyli miarodajność wskaźnika. Wskaźniki powinny umożliwić ocenę stanu procesu na konkretnych poziomach decyzyjnych:

- poziom strategiczny, który umożliwia podejmowanie kluczowych decyzji dla całego przedsiębiorstwa, na przykład wskaźnik PMP (ang. Percent Maintenance Planned) – odzwierciedlający skuteczność działań prewencyjnych,
- poziom taktyczny, gdzie decyzje mają istotne znaczenie dla poszczególnych działów lub linii produkcyjnych np. wskaźnik FPY (ang. First Past Yield) – odzwierciedlający efektywność procesu produkcyjnego,

- poziom operacyjny, gdzie decyzje są podejmowane przez operatorów na konkretnych stanowiskach, na przykład wskaźnik efektywnego wykorzystania czasu pracy (ECP) – odzwierciedlający efektywność czasu pracy na stanowisku produkcyjnym.

Trzecią istotną cechą jest kompletność elementów składających się na wskaźnik. Zdarza się często, iż w przedsiębiorstwach wskaźnik jest reprezentowany na wielu poziomach decyzyjnych, na przykład wskaźnik OEE, który może przyjmować wartość odzwierciedlającą stan pojedynczej maszyny, grupy maszyn, a także całego procesu produkcyjnego. W takiej sytuacji konieczne jest znalezienie rozwiązania dla wielu problemów, takich jak:

- w jaki sposób wyliczać (agregować) wartość wskaźnika: czy wartość należy sumować czy uśredniać? Czy wartość należy wyliczać dla wszystkich maszyn czy tylko dla tych, które zostaną uznane za kluczowe? Czy ustalać tę samą miarę (punkt odniesienia) dla całego przedsiębiorstwa czy dla poszczególnych działów zastosować różne?
- w jaki sposób interpretować wartość wskaźnika oraz jego poszczególne parametry składowe? Czy na przykład w parametrze wydajności uwzględniać straty technologiczne i utrzymania ruchu razem czy osobno? Czy w dostępności czasu produkcyjnego uwzględniać przerwy wymagane przepisami prawa (np. przerwy pracownicze)? Czy wartość wskaźnika dla pojedynczej maszyny i linii produkcyjnej obliczać według tego samego wzoru?
- w jaki sposób wybierać kluczowe wskaźniki dla danego obszaru? Czy lista wskaźników dla wydziału obróbki skrawaniem powinna być identyczna z listą wskaźników dla wydziału montażu? W przypadku odpowiedzi negatywnej, to jak porównać efektywność obu wydziałów? Jak analogicznie ocenić wartość wskaźnika np. jakości wyrobu w odniesieniu do różnych działów produkcyjnych?

Poprawny wybór składowych parametrów wskaźnika pozwala na dokładne odzwierciedlenie rzeczywistego stanu procesu, natomiast pominięcie części parametrów może prowadzić do nieprawidłowej oceny jego stanu. Decyzja o podjęciu działań korygujących na podstawie wartości wskaźnika, mimo że jego rzeczywista wartość nie wskazuje na konieczność takich działań albo odwrotnie – zaniechanie działań, choć wskaźnik wskazuje na ich konieczność, może prowadzić do podjęcia błędnych decyzji.

Kolejną charakterystyczną cechą jest wpływ na moment podejmowania decyzji, czyli aktualność wartości wskaźnika. Ta właściwość odgrywa istotną rolę w procesie podejmowania decyzji, ponieważ ocena stanu procesu oparta na historycznych wartościach wskaźnika (z poprzednich tygodni, dni, a nawet godzin) staje się nieprzydatna. Decyzje podejmowane na podstawie jednorazowego przekroczenia wartości granicznej wskaźnika mogą również zakłócić proces decyzyjny bez potrzeby. Monitorowanie wartości wskaźnika w czasie rzeczywistym wymaga jego cyfryzacji - kompleksowego połączenia danych świata rzeczywistego i wirtualnego tzn. fizycznych parametrów wskaźnika (np.: licznosc, temperatura, czas, dostępność) oraz systemu informatycznego (urządzenia, mierniki, algorytmy, oprogramowanie). Takie połączenie umożliwi monitorowanie wartości wskaźnika w czasie

rzeczywistym, uwzględniając wizualizację danych oraz wykorzystanie procedur ostrzegania i powiadamiania osób decyzyjnych.

Ostatnia główna cecha charakteryzująca wskaźniki efektywności jest związana z ich stabilnością. Odpowiednie zaprojektowanie wskaźnika w tym zakresie, będzie odpowiadało za jego podatność na zakłócenia. Należy zdecydowanie dążyć do ograniczenia wpływu zakłóceń na wskaźnik lub całkowicie próbować je wyeliminować. W tym kontekście podatność na zakłócenia można rozpatrywać jako jeden z aspektów niezawodności (Łapuńska i in., 2016). Pomocne na ocenę stabilności wskaźnika mogą być odpowiedzi na następujące pytania:

- czy dane, na których bazuje wskaźnik są zbierane regularnie?
- czy dane, na podstawie których jest obliczany wskaźnik wykazują cykliczny charakter?
- czy w danych mogą wystąpić istotne fluktuacje?

W takim rozumieniu wskaźnik powinien być odporny na regularne lub losowe wahania danych, na których jest oparty. W tym celu powinien opierać się na danych, które są zbierane regularnie. W działalności biznesowej przedsiębiorstwa zdarza się, iż nawet dane zbierane regularnie mogą wykazywać znaczne wahania. Wynikać to może z charakteru działalności, sezonowości produkcji czy nieprzewidywalności popytu na wyroby. W takiej sytuacji należy zastanowić się nad dostosowaniem wskaźnika, tak aby ukrywał te fluktuacje np. poprzez uśrednianie wartości.

#### **2.4.2. Metody pozwalające dobrać, wdrożyć i utrzymać system wskaźników KPI**

W erze, gdzie o powodzeniu w prowadzeniu biznesu często decyduje dostęp do informacji, umiejętność jej pozyskania, przetworzenia, zinterpretowania oraz wyciągnięcia na jej podstawie odpowiednich wniosków skutkujących podjęciem trafnej decyzji przez osoby zarządzające, z pomocą przychodzą metody doboru i wdrażania wskaźników efektywności. Opisują one uniwersalne mechanizmy i kroki postępowania, jakie powinna podjąć organizacja, chcąc z sukcesem kontrolować, monitorować, a przez to odpowiednio reagować na przebieg swoich procesów, co w zamierzeniu będzie ją prowadziło do zapewnienia efektywnej realizacji swoich długofalowych działań. Istnieje wiele metod doboru i wdrażania wskaźników efektywności. Wybór metody powinien być przede wszystkim dopasowany do strategii i celów przedsiębiorstwa z uwzględnieniem jego bieżących problemów.

Wprowadzenie w przedsiębiorstwie kompleksowego systemu opartego na wskaźnikach KPI jest istotnym krokiem w doskonaleniu poziomów zarządzania wewnątrz organizacji oraz umożliwia walidację systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji. W dynamicznym i zmiennym środowisku, gdzie różnorodne dane są dostępne w ogromnych ilościach, umiejętna selekcja i wybór właściwych wskaźników, a w dalszej kolejności ich monitorowanie oraz rozwijanie staje się zadaniem angażującym duże zasoby przedsiębiorstwa, ale mogącym znacznie przyczynić się do jego skutecznego rozwoju. W tym kontekście, przedstawiono metody, które mogą być wykorzystane w procesie doboru, wdrożenia

i utrzymania systemu wskaźników, ze szczególnym uwzględnieniem ich praktycznej aplikacji oraz potencjalnych korzyści dla przedsiębiorstwa:

- metoda „zwycięskich KPI” (Parmenter, 2019) - powiązana z krytycznymi czynnikami sukcesu (ang. CSFs – critical success factors), decydującymi o przewadze konkurencyjnej danego przedsiębiorstwa. Wyselekcjonowane jako najważniejsze dla organizacji, są motorem do wyznaczenia KPI, z tego też powodu wszyscy jej członkowie powinni je znać i być na nich skoncentrowani. W założeniu każdy kluczowy wskaźnik efektywności ma charakter niefinansowy i jest poddawany cyklicznemu pomiarowi. Cała załoga rozumie zasady jego pomiaru, potrafi zinterpretować uzyskany wynik oraz jest gotowa wdrożyć ewentualne działania korekcyjne. Wyznaczenie odpowiednich miar efektywności jest wewnętrznym zadaniem organizacji i nie może być realizowane przez konsultantów zewnętrznych na bazie przeprowadzonych obserwacji. Cały proces dotyczący wdrażania KPI musi być dokładnie zaplanowany, przy pełnym wsparciu kadry zarządzającej oraz pozostałych pracowników, a raportowanie wyznaczonych miar odbywać się powinno z wykorzystaniem uprzednio przygotowanych do tego odpowiednich szablonów. Całość prac realizowana jest w specjalnie do tego celu powołanym zespole. Sugerowane jest wyznaczenie mniej niż dziesięciu KPI dla organizacji, a przed wdrożeniem jasne określenie jaki jest ich cel stosowania i czemu mają służyć. Zaproponowany uniwersalny pierwotny proces implementacji składa się z dwunastu kroków, których bazą jest siedem „kamieni węgielnych”. W nowym podejściu są one traktowane jako fundament do składającego się z kolei z sześciu etapów procesu wdrażania;
- metoda Balanced Scorecard (ang. BSC - zrównoważona karta wyników) (Kaplan, 2010) - charakteryzuje się zachowaniem równowagi pomiędzy wskaźnikami efektywności odnoszącymi się do opisu zdarzeń przeszłych, a wskaźnikami służącymi do prognozowania zdarzeń mających wystąpić w przyszłości, a także pomiędzy wskaźnikami odnoszącymi się do wewnętrznych procesów realizowanych w organizacji, a tymi związanymi z zewnętrznym pomiarem satysfakcji klienta. Proces wdrażania jest inicjowany przez kierownictwo najwyższego szczebla oraz wymaga jego stałego zaangażowania. Umożliwia to precyzyjne sformułowanie, co konkretnie należy mierzyć w przedsiębiorstwie, aby skutecznie potrafić ocenić jak efektywnie jest realizowana jego strategia. Wyznaczony przy tym zestaw celów oraz przypisanych do nich wskaźników, pozwala osobom decyzyjnym na szybką wielokryterialną ocenę funkcjonowania prowadzonego przez siebie biznesu, zarówno w odniesieniu do wskaźników finansowych jak i operacyjnych. Monitorowanie działalności przedsiębiorstwa odbywa się w czterech istotnych dla organizacji perspektywach: finansowej, procesów wewnętrznych, rozwoju, klientów. Na każdą perspektywę składają się: cele ogólne i cele szczegółowe, wskaźniki oraz inicjatywy, rozumiane jako realizacja zadań służących osiągnięciu wyznaczonych celów. Perspektywy tworzą z kolei łańcuch przyczynowo-skutkowy rozumiany jako wypracowanie mechanizmu, w którym poprawa realizacji celów w którejś z wymienionych

perspektyw, będzie wpływała na poprawę realizacji celów w następnej. Wszystkie wskaźniki wyznaczone w tym podejściu są uważane jako ważne dla organizacji, a ich liczba nie jest odgórnie ograniczona;

- metoda Hoshin Kanri (Melander i in., 2016) (Giordani da Silveira i in., 2018) (Thürer i in., 2019) - pozwala na zbudowanie powiązań pomiędzy wyznaczoną strategią, a realizacją biznesu w oparciu o zidentyfikowane cele. Obejmuje pionowe i poziome dostosowanie komunikacji, działań oraz funkcji w organizacji do jej ściśle określonej i zdefiniowanej wizji, poprzez zaangażowanie wszystkich pracowników firmy, na każdym jej szczeblu, od najwyższego kierownictwa do pracowników bezpośrednio produkcyjnych. Prowadzi do wypracowania schematu działania, w którym całe przedsiębiorstwo jest podporządkowane realizacji wspólnie wytyczonej polityki, dzięki zbieżności strategii oraz celów i każdego dnia podąża w jednym kierunku, aby je zrealizować. Systematyczne podejście do wdrażania wizji firmy wykorzystuje powtarzający się cykl (PDCA) służący ciągłemu doskonaleniu, a także proces „Catchball”. Umożliwia on uzyskanie dwukierunkowej informacji zwrotnej poruszając się w dół struktury organizacyjnej, tak aby wspólnie wypracować konsensus. Wymiana informacji zwrotnych na temat strategii, celów, planów, pomysłów i ich rozwoju służy przewidywaniu problemów i pomaga w udoskonaleniu postępowania w kolejnych okresach planistycznych. Hoshin Kanri jest realizowana przez włączanie celów do przebiegu codziennej pracy. Cele określone w planach działania są zintegrowane z zarządzaniem każdego dnia rutynowymi czynnościami, tak aby były stale poddawane kontroli i modyfikacjom. W ten sposób postęp w ich osiągnięciu jest stale monitorowany.

Wybór metody pozwalającej wdrożyć i utrzymać system wskaźników KPI to złożony proces, który opiera się na kilku istotnych czynnikach zapewniających jego skuteczność w prowadzeniu do sukcesu organizacyjnego. W jego centrum znajduje się konieczność pełnego zaangażowania kierownictwa organizacji. Liderzy muszą stać na czele przyjęcia KPI, jako integralnego elementu realizacji celów strategicznych, promując kulturę podejmowania decyzji opartych na danych na wszystkich szczeblach organizacji. Niezbędne jest także dobranie KPI, tak aby były one zgodne z głównymi celami strategicznymi organizacji. Każdy wskaźnik powinien być starannie wybrany, aby odzwierciedlać konkretne aspekty działalności, które istotnie przyczyniają się do osiągania tych celów. Taka zgodność nie tylko zapewnia jasność, ale również gwarantuje, że wysiłki i zasoby są skoncentrowane na działaniach przynoszących postęp w realizacji zamierzonych rezultatów. Kultura podejmowania decyzji oparta na danych musi przenikać przez całą organizację. Obejmuje to nie tylko zbieranie i analizowanie danych, ale także integrację tych wniosków w codzienne procesy podejmowania decyzji. Pracownicy na wszystkich szczeblach powinni być wyposażeni w odpowiednie narzędzia i szkolenia, aby efektywnie rozumieć, interpretować i reagować na dane KPI. Taka strategia sprzyja odpowiedzialności i stymuluje proaktywne rozwiązywanie problemów na podstawie rzeczywistych wskaźników wydajności. Ważne jest również ciągłe monitorowanie, przegląd i dostosowywanie KPI. Przedsiębiorstwa muszą regularnie oceniać czy wybrane wskaźniki są nadal odpowiednie w świetle zmieniających się warunków biznesowych, dynamiki rynkowej i zmian strategicznych. Taka stała ewaluacja zapewnia, że KPI pozostają elastyczne i reagują

na zmiany, dostarczając istotnych wniosków dotyczących trendów wydajności, efektywności, jakości itd.

Podsumowując, wdrożenie i utrzymanie solidnego systemu kluczowych wskaźników efektywności wymaga strategicznego połączenia zaangażowania kierownictwa, strategicznej zgodności, kultury opartej na danych, ciągłego monitorowania oraz wsparcia technologicznego. Poprzez przyjęcie tych zasad, przedsiębiorstwa mogą wykorzystać potencjał KPI do napędzania poprawy w monitorowanych obszarach, wspierania innowacji i osiągania zrównoważonego wzrostu zgodnie z ustanowionymi celami. Warte podkreślenia jest zasadnicza funkcja technologii we wsparciu w udanym wdrożeniu systemu KPI. Przedsiębiorstwa powinny inwestować w solidną infrastrukturę danych, narzędzia analityczne i mechanizmy raportowania, które umożliwiają monitorowanie danych KPI w czasie rzeczywistym i ich szybkie rozpowszechnianie. Automatyzacja procesów zbierania danych i raportowania usprawnia działania, redukuje wysiłek manualny oraz poprawia terminowość i dokładność wniosków dotyczących wydajności i bardzo dobrze wpisuje się w adaptacyjny system sterowania produkcją.

## **2.5. Wnioski z badań literaturowych**

Skuteczne sterowanie procesem produkcji odgrywa istotną rolę w poprawie efektywności i konkurencyjności przedsiębiorstwa na współczesnym globalnym rynku. Poprzez wdrożenie solidnych mechanizmów kontroli, przyjęcie najlepszych praktyk oraz zaakceptowanie i wdrożenie technologii cyfrowych, przedsiębiorstwa mogą usprawniać swoje procesy produkcyjne, minimalizować koszty oraz dostarczać wyższą wartość klientom, co nie gwarantuje, ale z pewnością zwiększa szanse na odniesienie długoterminowego sukcesu i stabilności.

Złożoność przedstawionego zagadnienia adaptacyjnego sterowania produkcją obejmuje: monitorowanie realizacji zlecenia, analizę wykonalności planu, ocenę zdolności jakościowej procesu i prognozowanie jego stanów. Zaproponowany model decyzyjny uwzględnia różnorodne techniki wytwarzania, co umożliwia bieżącą analizę i identyfikację potencjalnych zagrożeń, takich jak opóźnienia w realizacji zleceń, awarie maszyn, wytwarzanie wadliwych wyrobów czy przestoje. Dane dotyczące stanu procesu są pozyskiwane online z urządzeń technologicznych, a na ich podstawie system wskazuje zagrożenia dla przepływu produkcji oraz potencjalne rozwiązania, co umożliwia wprowadzenie adaptacyjnego sterowania produkcją. W porównaniu do systemów MES, proponowane rozwiązanie jest bardziej zaawansowane, umożliwiając analizę i prognozowanie konsekwencji stanu aktualnego oraz proponowanie działań korygujących. Aby model był wiarygodny, a decyzje skuteczne, konieczne jest uwzględnienie we wnioskowaniu dużej liczby różnorodnych danych (czynników). Z pomocą w takim przypadku przychodzą algorytmy sztucznej inteligencji oraz metody wielokryterialnego wspomagania podejmowania decyzji (np. reguły priorytetów, sztuczne sieci neuronowe, drzewa decyzyjne, algorytmy genetyczne i inne), które pozwalają na analizę i interpretację dużych i złożonych zbiorów danych i podjęcie decyzji zarządczej w akceptowalnym czasie.

Jednym z najważniejszych narzędzi umożliwiających badanie, pomiar oraz ocenę wybranych parametrów charakteryzujących sprawne funkcjonowanie przedsiębiorstwa na różnych szczeblach, są kluczowe wskaźniki efektywności – KPI (Jahangirian i in., 2017). Dążąc do maksymalizacji efektów z wykonywanej w przedsiębiorstwie pracy, istotne jest monitorowanie wartości zdefiniowanych kluczowych wskaźników w zarządzaniu produkcją na trzech poziomach: strategicznym, operacyjnym i taktycznym, w połączeniu z różnymi obszarami oddziaływania. Takie podejście umożliwiło opracowanie modelu hierarchicznej struktury wskaźników, pozwalającego na ukazanie korelacji, jakie zachodzą dla: poziomu sterowania, obszaru oddziaływania oraz wskaźników, a także walidację całego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji w FAS.

Przy ocenie stanu procesu wytwarzania ważna jest umiejętność odkrywania i rozumienia reguł rządzących procesem oraz zdolność przewidywania jego przyszłych stanów i szybkiego reagowania na stany niepożądane. Wyzwaniem jest problem z realizacją sprawnie działającego sprzężenia informacyjnego pomiędzy metodami oceny stanu procesu, a pozostałymi elementami systemu. Tradycyjne narzędzia nie posiadają mechanizmów ekstrakcji informacji prognostycznych oraz wspomagających podejmowanie decyzji o ewentualnych działaniach, nie pozwalają też w analizie na jednoczesne uwzględnienie danych związanych ze stosowaną technologią, wyrobem, parametrami maszyn, środowiskiem itp. Analiza takich zmiennych pozwoliła w praktyce odkryć zależności pomiędzy nimi i zbudować skuteczne modele prognostyczne dla procesu.

Oczekuje się, że uzyskane dzięki tym badaniom spostrzeżenia nie tylko przyczynią się do pogłębienia wiedzy teoretycznej w tej dziedzinie, ale także zapewnią praktyczne implikacje dla średnich przedsiębiorstw metalowych pragnących usprawnić swoje procesy produkcyjne przy użyciu technologii cyfrowych. Celem pracy jest wykazanie, że dzięki adaptacyjnemu systemowi sterowania procesem produkcji, integrującemu hierarchiczną strukturę wskaźników z modelami wspomagania decyzji w zintegrowanym systemie informatycznym, przedsiębiorstwa mogą osiągnąć znaczną poprawę zarówno efektywności jak i jakości.

### 3. CEL I ZAKRES PRACY

Jak wykazano wcześniej, współczesne systemy produkcyjne zawierają wiele komponentów elektronicznych, są wyposażone w zaawansowane układy pomiarowe pozwalające na pozyskiwanie dużej liczby danych i informacji o procesie. Stąd, coraz trudniej opisać proces produkcyjny z zastosowaniem klasycznych sposobów rozumowania, opartych na jawnych związkach przyczynowo-skutkowych, wyrażonych spójnymi modelami matematycznymi, a w sytuacji, kiedy jest to możliwe, okazuje się, że czas opisu jest za długi. Z tego też powodu w adaptacyjnych systemach sterowania procesem produkcji niezbędnym staje się zaimplementowanie algorytmów sztucznej inteligencji czy metod wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji. W obszarze kompleksowych systemów produkcyjnych, istotnym aspektem staje się precyzyjny wybór odpowiednich metod wspomaganie decyzji, mających wpływ na osiągnięte przez model wyniki. Determinuje to jakość i trafność podejmowanych decyzji, a także wpływa na efektywność całego systemu. Niewłaściwie dobrana metoda może prowadzić do wniosków pozbawionych poparcia w rzeczywistości, co w konsekwencji może skutkować błędnymi decyzjami na wszystkich szczeblach zarządzania.

W kontekście nowoczesnych systemów adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, takich jak te wykorzystujące uczenie maszynowe i sztuczną inteligencję, równie ważna pozostaje sama jakość pozyskiwanych danych. Modele uczenia maszynowego są trenowane na podstawie dostępnych danych historycznych. Niska ich jakość prowadzi do wytrenowania słabych modeli, które mogą generować błędne prognozy i decyzje. Wysokiej jakości dane pozwalają na trenowanie bardziej precyzyjnych i efektywnych modeli, które mogą znacznie poprawić efektywność adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji.

Monitorowanie przebiegu procesów biznesowych oraz ich walidacja odbywać się może dzięki analizie wskaźników KPI. Wskaźniki KPI są wykorzystywane do pomiaru i oceny istotnych pod względem strategicznym, operacyjnym i taktycznym parametrów charakteryzujących funkcjonowanie przedsiębiorstwa. Analiza wartości wskaźników umożliwia dynamiczną ingerencję w proces planowania i sterowania produkcją poprzez ocenę odchyłeń od zaplanowanych wartości. Niezmiernie ważnym aspektem z punktu widzenia celów strategicznych przedsiębiorstwa jest właściwa identyfikacja istotnych obszarów w procesie zarządzania produkcją. Dla tak zidentyfikowanych obszarów należy opracować kluczowe wskaźniki odzwierciedlające istotne charakterystyki procesu produkcji oraz umożliwiające skuteczną ocenę realizowanych celów na każdym poziomie decyzyjnym. Ze względu na złożoność procesów planowania i sterowania produkcją zasadniczym wyzwaniem staje się budowa zintegrowanego systemu wspomaganie zarządzania i doskonalenia procesów.

**Celem pracy** było opracowanie koncepcji oraz wdrożenie adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji opartego na autonomicznych metodach wspomaganie decyzji.

Biorąc pod uwagę powyższe, zdaniem autora pracy istnieje zatem uzasadniona potrzeba opracowania metodyki wspomaganie modelowania, monitorowania oraz sterowania procesem produkcyjnym, tak aby w ograniczonych uwarunkowaniach funkcjonowania przedsiębiorstwa zwiększyć efektywność tego procesu. Co więcej integracja zdarzeń i informacji z wielu

stanowisk produkcyjnych oraz okołoprodukcyjnych dostarczających ogromną ilość danych w czasie rzeczywistym wymaga wyboru oraz oprogramowania modelu decyzyjnego oraz jego skutecznego zaimplementowania w zintegrowanym systemie informatycznym do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji.

W związku z tym przyjęto następujące założenia dla systemu adaptacyjnego sterowania produkcją obejmującego zaproponowaną metodykę oraz oprogramowany model decyzyjny:

1. Możliwe jest opracowanie struktury modelu zarządzania wskaźnikami odzwierciedlającej hierarchiczną strukturę poziomów zarządzania,
2. Każdy węzeł struktury można opisać w sposób obiektowy, przypisując mu parametry i atrybuty istotne dla każdego poziomu zarządzania oraz cechy powiązane z obszarami przedsiębiorstwa,
3. Taka struktura umożliwia powiązanie wskaźników z atrybutami obiektów i weryfikację oddziaływania wskaźników na zdefiniowane cele zarządzania,
4. Przenikanie obszarów przedsiębiorstwa i poziomów decyzyjnych umożliwia wyznaczenie zależności pomiędzy poszczególnymi cechami wskaźników oraz agregowanie ich wartości,
5. Możliwe jest opracowanie bazy wiedzy i modelu analizowania tej wiedzy, pozwalających wskazać najlepszą decyzję operacyjną dla zadanych uwarunkowań systemu produkcyjnego i pod względem przyjętych kryteriów,
6. Integracja zdarzeń i informacji z wielu stanowisk produkcyjnych oraz okołoprodukcyjnych służy budowie wiarygodności modelu, a także zwiększaniu skuteczności podejmowanych decyzji, dzięki uwzględnieniu we wnioskowaniu dużej liczby różnorodnych danych.

Dla sformułowanego i przedstawionego celu głównego oraz przyjętych założeń autor określił następujące cele poznawcze:

1. Identyfikacja i charakterystyka metod zarządzania oraz wspomagających sterowanie procesem produkcji wpływających na efektywność procesu produkcji i jakość wyrobów wytwarzanych w przedsiębiorstwie, pod kątem modyfikacji strategii zarządzania przedsiębiorstwa,
2. Identyfikacja czynników wpływających na efektywność procesu produkcji oraz jakość wyrobów dla wybranego bieżącego procesu produkcyjnego w przedsiębiorstwie,
3. Identyfikacja i charakterystyka: metod, które mogą być wykorzystane w procesie doboru, wdrożenia i utrzymania systemu wskaźników KPI oraz samych wskaźników KPI umożliwiających monitorowanie przebiegu oraz walidację wybranego procesu produkcyjnego,
4. Opracowanie teoretycznego modelu wybranego procesu produkcyjnego umożliwiającego doskonalenie organizacji pracy i metod zarządzania,
5. Walidacja metod oceny stanu procesu produkcyjnego oraz metod formalnego sposobu zapisu wiedzy oraz wskazanie metod przydatnych dla realizowanego celu głównego.

Jako **cel użytkowy** pracy autor przyjął natomiast opracowanie prototypu zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego adaptacyjne sterowanie produkcją oraz usprawnienie obiegu informacji w procesie produkcyjnym.

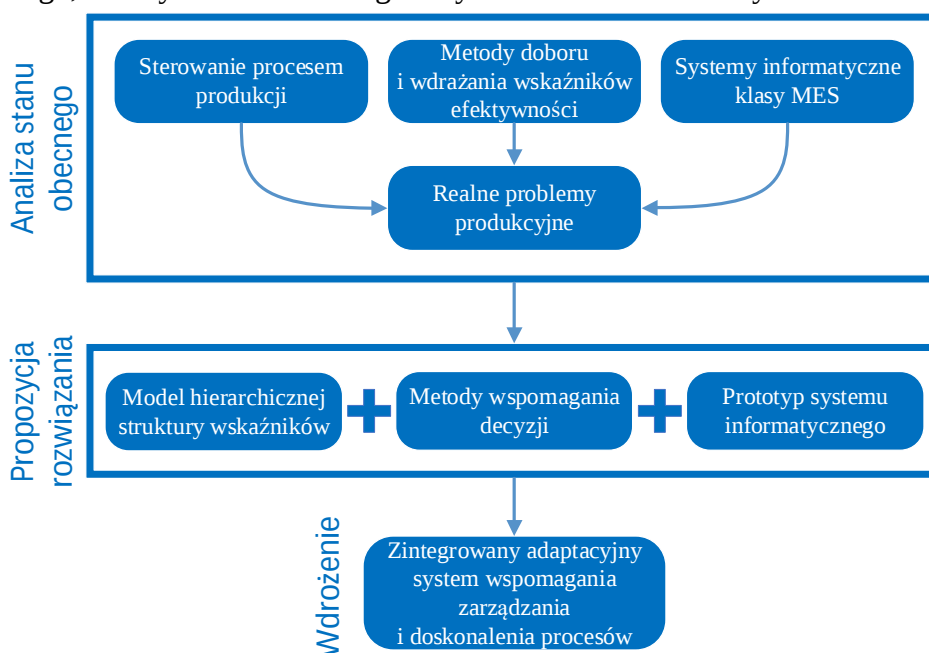
Podjęte badania były podstawą do sformułowania i przyjęcia następującej tezy:

*Adaptacyjne sterowanie procesem produkcji zwiększa efektywność procesu produkcji oraz poziom jakości produkowanych wyrobów*

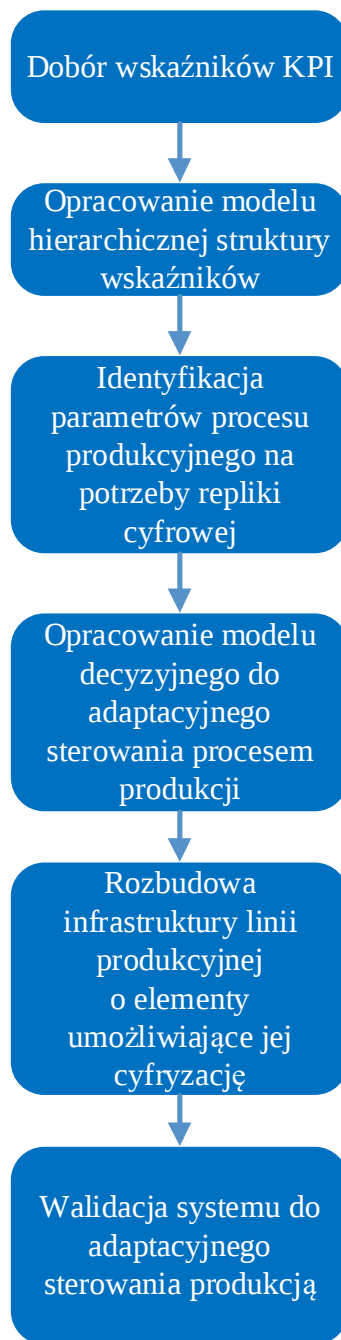
Problemem badawczym pracy było:

1. Analiza bieżącego stanu procesu produkcyjnego w odniesieniu do zdefiniowanych celów zgodnych z przyjętą strategią zarządzania wraz z identyfikacją barier oraz ograniczeń w implementacji technologii cyfrowych,
2. Wyodrębnienie obszarów istotnie wpływających na cele strategiczne wraz z kluczowymi charakterystykami tych obszarów oraz cechami dla wskazanych charakterystyk. Wyznaczenie odpowiadających im wskaźników KPI.
3. Dobranie metod sterowania procesem produkcji i jakością wyrobu w taki sposób, aby umożliwić integrację informacji i zdarzeń z wielu stanowisk produkcyjnych wykorzystujących różnorodne technik wytwarzania, adekwatnych do charakterystyki wybranego procesu produkcji i pozwalających uzyskać jego akceptowalną efektywność i jakość wyrobów,
4. Określenie metod formalnego sposobu zapisu wiedzy, umożliwiających wspomaganie działań użytkownika przez zintegrowany system informatyczny, dzięki wykorzystaniu już pozyskanej, sformalizowanej i zgromadzonej wiedzy o przebiegu procesu produkcyjnego.

Na rysunku 3.1 przedstawiono ogólny schemat realizacji badań oraz wdrożenia przemysłowego, a na rysunku 3.2 szczegółowy schemat badań własnych.



Rys. 3.1 Ogólny schemat realizacji badań oraz wdrożenia przemysłowego



Rys. 3.2 Szczegółowy schemat badań własnych

Strukturę oraz treść rozprawy doktorskiej w zasadniczy sposób determinuje przedstawiona geneza problemu, a w dalszej kolejności postawione cele. W ten sposób w pierwszym etapie realizacji pracy doktorskiej, w rozdziale pierwszym ogólnie zarysowano tematykę dotyczącą wybranego problemu, a w rozdziale drugim dokonano teoretycznej analizy literatury związanej z obranym tematem pracy. Scharakteryzowano sterowanie procesem produkcji, ze szczególnym uwzględnieniem trendów i innowacji w tym obszarze wiedzy. Omówiono definicję i cele adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, a także przedstawiono metody, techniki, rozwiązania i systemy wspomagające ten proces. Przeanalizowano również metody walidacji systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji w oparciu o wskaźniki KPI.

W drugim etapie realizacji pracy doktorskiej, w rozdziale trzecim i czwartym, przedstawiono cel i zakres pracy, scharakteryzowano wybrany proces produkcji w FAS, którego dotyczyły przeprowadzone badania i dokonano jego diagnozy. Przedstawiono także koncepcję modelu hierarchicznej struktury wskaźników wspomagających proces sterowania produkcją oraz koncepcję modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu.

W trzecim etapie realizacji pracy doktorskiej, w rozdziale piątym i szóstym, przedstawiono dokonane wdrożenie i przeprowadzono praktyczną weryfikację opracowanych wcześniej modeli, poprzez przykładową realizację w zastosowaniu w wybranym procesie produkcyjnym. Potwierdzono skuteczność zaproponowanych modeli, prawidłowość przyjętych założeń i rozwiązań oraz możliwość ich zastosowania i przydatność do adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie prac i plan dalszych badań.

## 4. PROCES PRODUKCJI KORPUSU WODOMIERZA W FAS

### 4.1. Stosowana technologia, przepływ informacji oraz podejmowanie decyzji w procesie – stan wyjściowy

W pracy doktorskiej do badań wybrano złożony proces produkcji mosiężnych korpusów wodomierza, których widok ogólny przedstawiono na rysunku 4.1. Proces ten obejmuje różnorodne techniki wytwarzania i szereg stanowisk produkcyjnych, skonfigurowanych zarówno, jako samodzielne komórki produkcyjne, jak i stanowiska ułożone w linii produkcyjne. Realizacja procesu wymaga z jednej strony zapewnienia wysokiej jakości wyrobu, aby sprostać oczekiwaniom klientów, a z drugiej strony podlega dużej presji rynkowej na obniżenie kosztów końcowego produktu (Meller, Piechowski, i in., 2023). W rezultacie FAS musi nieustannie dążyć do redukcji poziomu wyrobów zawierających wady jak i zwiększenia efektywności całego procesu, obejmującego w szczególności skuteczność wykorzystania posiadanego parku maszynowego oraz zarządzania przepływem materiałów i zapasami.



Rys. 4.1 Widok ogólny na obrabiane korpusy wodomierza mieszkaniowego  
(<https://www.fa-swarzedz.com.pl/korpusy-wodomierzy-i-cieplomierzy/>, 2024)

Jako lider konsumpcji mosiądzu w Polsce, FAS dysponuje nowoczesnymi technologiami z zakresu obróbki plastycznej na gorąco, obróbki cieplnej oraz obróbki skrawaniem. Na rozbudowany park maszynowy składają się m.in. prasy hydrauliczne do kucia matrycowego bezodpadowego czy specjalistyczne maszyny transferowe do obróbki ubytkowej wyrobów typu trójnik. Pozwala to realizować zamówienia na wymagający rynek automotive (stalowe pierścienie synchronizatora skrzyni biegów) oraz opomiarowania wody i ciepła (wodomierze, ciepłomierze) w oparciu o rygorystyczne wymagania dla wyrobów mających kontakt z wodą pitną (Chruściński i in., 2021). Misją FAS jest kształtowanie nowoczesnego przemysłu w oparciu o politykę ciągłego podnoszenia jakości produktów i precyzji ich wykonania oraz politykę ciągłego doskonalenia efektywności przedsiębiorstwa z uwzględnieniem zrównoważonego rozwoju w obszarach: kompetencji kadry, etyki biznesowej, odpowiedzialności społecznej, ekologii, organizacji, a także technologii, w tym cyfryzacji.

Przeprowadzone badania związane były z modelem procesu produkcji realizowanym w warunkach operacyjnych, który obejmował procesy technologiczne: cięcia materiału, kucia matrycowego na gorąco, śrutowania, obróbki skrawaniem oraz montażu, a także sam pomiar wyrobów wykorzystywanych do opomiarowania zużycia wody pitnej (dalej: „proces technologiczny”). Przebieg procesu technologicznego wraz z wyszczególnieniem maszyn i urządzeń, które w zależności od wybranej ścieżki produkcyjnej mogą brać w nim udział, przedstawiono w załączniku pod numerem Z.1, natomiast widok przedkuwki po operacji cięcia oraz korpusu wodomierza po kolejnych operacjach technologicznych przedstawiono na rysunkach 4.2 - 4.6.



*Rys. 4.2 Przedkuwka po operacji cięcia*



*Rys. 4.3 Korpus wodomierza po operacji kucia matrycowego*



*Rys. 4.4 Korpus wodomierza po operacji śrutowania*



*Rys. 4.5 Korpus wodomierza po operacji obróbki skrawaniem*



*Rys. 4.6 Korpus wodomierza po operacji montażu płyty spiętrzającej, sitka i ośki wirnika*

Badania rozpoczęto od diagnozy przepływu informacji w trakcie realizacji procesu produkcji korpusu wodomierza, co obejmowało zrozumienie powiązań między jakością produktu, a innymi wielkościami powstającymi w ramach konkretnej operacji technologicznej, a także pomiędzy samymi operacjami, a stanowiskami produkcyjnymi, z uwzględnieniem sprzężeń zwrotnych, co zilustrowano na rysunku 4.7.



Rys. 4.7 Niski poziom jakości decyzji w procesie produkcji korpusu wodomierza – stan początkowy

Przeprowadzona diagnoza jednoznacznie wskazała, iż w przebiegu procesu produkcji korpusu wodomierza, występował szereg miejsc, gdzie nie pozyskiwano informacji istotnych dla efektywnego przeprowadzenia procesu technologicznego, a tym samym minimalizujących ryzyko powstawania wyrobów niezgodnych. Nawet jeżeli takie informacje były pozyskiwane, to albo nie przeprowadzano ich rejestracji albo powstałe zapisy przyjmowały formę analogową. Prowadzenie i przechowywanie zapisów w formie analogowej podlega wielu ograniczeniom, którym stara się przeciwdziałać na przykład wdrożenie w przedsiębiorstwach opisanej we wcześniejszej części pracy zrobotyzowanej automatyzacji procesów (RPA) lub inteligentnej automatyzacji procesów (IPA). Przetwarzanie analogowych danych, przede wszystkim jest czasochłonne i podatne na błędy. Ręczne wprowadzanie, analizowanie i przekazywanie informacji może prowadzić do nieścisłości, pomyłek i przeoczeń, co z kolei wpływa na dokładność wniosków. W przeciwieństwie do danych cyfrowych, które mogą być łatwo filtrowane, sortowane i analizowane za pomocą zaawansowanych narzędzi analitycznych, analogowe zapisy wymagają manualnej pracy, co zwiększa ryzyko błędów ludzkich. Ponadto, analogowe dane są często trudne do zintegrowania z nowoczesnymi systemami informatycznymi. Dane muszą być najpierw zdigitalizowane, co jest procesem kosztownym i czasochłonnym, zanim mogą być użyte w zaawansowanych analizach. To nie tylko opóźnia proces decyzyjny, ale również może prowadzić do utraty cennych informacji podczas konwersji. Co więcej, analogowe zapisy mają ograniczoną zdolność do przechowywania i organizowania ich w duże zbiory. W miarę jak przedsiębiorstwa gromadzą coraz większe ilości danych, zarządzanie analogowymi zapisami staje się niepraktyczne. Trudno jest przeszukiwać, indeksować i analizować duże ilości papierowych dokumentów, co znacznie utrudnia identyfikację trendów, wzorców i anomalii. Bez możliwości szybkiego dostępu do

zintegrowanych i zorganizowanych danych, wyciąganie wniosków i podejmowanie skutecznych decyzji zarządczych staje się wysoce utrudnione. W analizowanym przypadku procesu produkcji korpusu wodomierza jakość, ilość oraz sposób pozyskiwania informacji były daleko niewystarczające, aby móc skutecznie badać, analizować i oceniać wpływ poszczególnych parametrów procesowych na dalszy przebieg procesu technologicznego i końcową jakość wyrobu, w związku z czym poziom podejmowania decyzji zarządczych był niski.

Jak każdy proces technologiczny, również proces produkcji korpusu wodomierza posiada swoją specyfikę i unikalne uwarunkowania. Wymagania jakościowe stawiane dla korpusów wodomierza kładą zdecydowany nacisk na uzyskaną końcową charakterystykę wymiarową wraz z odchyłkami kształtu i położenia dla wytwarzanego wyrobu po operacjach montażowych, co ma krytyczny wpływ na jego dalsze funkcjonowanie w warunkach bieżącej eksploatacji. Określony prawem czas pomiędzy kolejnymi okresami legalizacji wyrobu oraz ściśle zdefiniowane parametry uzyskiwanej podczas pracy dokładności pomiaru zużycia wody pitnej, tak ważne m. in. ze względu na dbałość o środowisko naturalne, wyznaczają konkretny wąski zakres tolerancji dla wybranych istotnych charakterystyk, które zostaną szerzej przedstawione w dalszej części pracy. Wpływ na ich poprawne uzyskanie mają przede wszystkim parametry procesowe, w jakich odbywa się produkcja korpusu wodomierza w ramach wykonywania poszczególnych operacji technologicznych, uwzględniające, m.in. stosowany materiał, technologię, maszyny i urządzenia oraz warunki operacyjne (doświadczenie i umiejętności kadry, sposób organizacji działań) stosowane w FAS.

Odpowiedzią na spełnienie ostatecznych wymagań stawianych przed korpusem wodomierza (jakościowych, wytrzymałościowych, eksploatacyjnych, ale również kosztowych) oraz przedstawionym wcześniej problemom dotyczącym efektywnego przepływu i analizy informacji było opracowanie i skuteczne wdrożenie systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji obejmującym wykorzystanie technologii cyfrowych, którego szczegółowe założenia projektowe przedstawiono w dalszej części pracy.

## **4.2. Założenia projektowe**

### **4.2.1. Badania ankietowe - gotowość i potencjał do wdrażania elementów koncepcji Przemysłu 4.0 w MŚP branży metalowej**

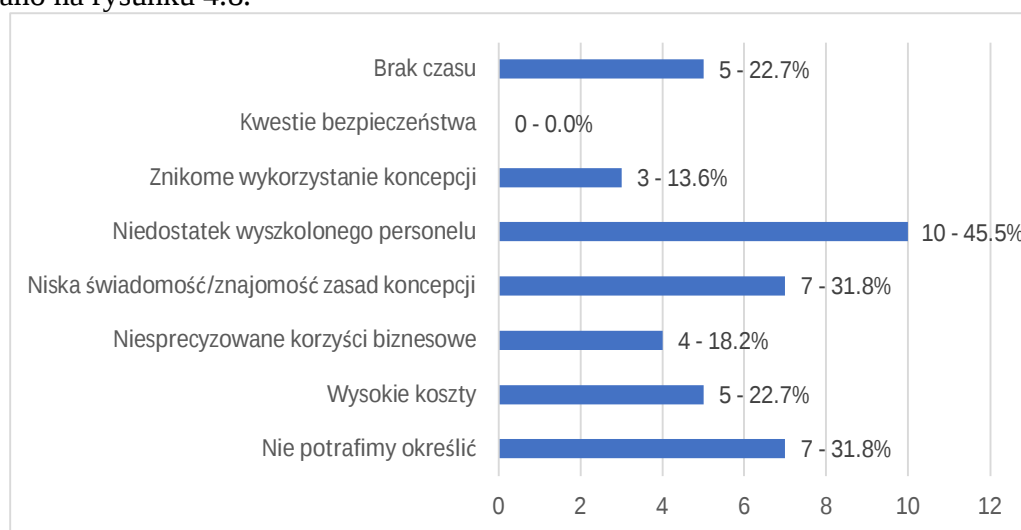
W celu zrozumienia oraz zidentyfikowania barier i wyzwań, które napotykają MŚP podczas wdrażania technologii związanych z Przemysłem 4.0., ale również przede wszystkim, aby starać się ograniczyć lub uniknąć błędów podczas wdrażania systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza w FAS, autor pracy przeprowadził ankietę wśród MŚP metalowych. Opracowana ankieta miała na celu zweryfikowanie poziomu znajomości zasad koncepcji przemysłu 4.0 oraz poziomu zaawansowania technologicznego produkcji i jej cyfryzacji. Kolejnym jej celem było także znalezienie odpowiedzi na pytanie: Czy przedsiębiorstwa działające w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw metalowych potrafią oznaczyć zagrożenia i bariery przy wdrażaniu we własnych strukturach elementów nowoczesnych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych?

Dzięki wykorzystaniu opisanej w pierwszej części pracy metody Benchmarkingu, która posłużyła do oceny badań ankietowych, możliwe stało się skonfrontowanie miejsca, gdzie znajduje się pod tym względem FAS w stosunku do innych przedsiębiorstw działających w analogicznym segmencie rynku. Z tego też powodu przeprowadzone badanie ankietowe składające się z siedmiu pytań podzielono na następujące główne obszary badawcze (Meller i in., 2021):

- znajomość i gotowość do wdrożenia koncepcji Przemysłu 4.0,
- cyfryzacja produkcji,
- ograniczenia cyfrowego potencjału rozwojowego.

Przeprowadzone badania ankietowe skupiały się przede wszystkim na działach produkcyjnych małych i średniej wielkości przedsiębiorstw metalowych. Było to podejście bardziej wąskie niż w dotychczas dostępnych opracowaniach dotyczących wdrażania koncepcji Przemysłu 4.0 opisujących z reguły całe sektory oraz branże (Cugno i in., 2021) (McKinsey&Company, 2015). Takie podejście pozwoliło na szczegółowe określenie ograniczeń, wyzwań i perspektyw stojących przed małymi i średniej wielkości przedsiębiorstwami metalowymi chcącymi aktywnie wziąć udział i skorzystać z rozwiązań oferowanych przez kolejną rewolucję przemysłową.

Badanie przeprowadzono za pomocą kwestionariusza rozsyłanego do przedsiębiorstw spełniających wyznaczone warunki w miesiącach kwiecień-sierpień 2021 r. Badanie objęło swoim zasięgiem 40 przedsiębiorstw metalowych, mających swoją siedzibę w Polsce, z czego uzyskano pełnowartościową odpowiedź od 25 ankietowanych podmiotów. Wyznaczonymi kompetentnymi osobami do udzielania odpowiedzi w ankiecie byli właściciele zakładów produkcyjnych lub dyrektorzy produkcji. Spośród ankietowanych obszarów badawczych na szczególną uwagę zwrócono na ograniczenia cyfrowego potencjału rozwojowego. Pytanie dotyczące trudności, jakie małe i średnie przedsiębiorstwa mogą napotkać w trakcie przygotowywania się do implementacji nowoczesnych rozwiązań informatycznych brzmiało: Jakże Państwo identyfikują potencjalne lub rzeczywiste bariery we wdrażaniu koncepcji Przemysłu 4.0 w ramach Państwa działu produkcji? Zestawienie otrzymanych odpowiedzi pokazano na rysunku 4.8.



Rys. 4.8 Wyzwania i zagrożenia we wprowadzaniu zasad koncepcji Przemysłu 4.0 (Meller i in., 2021)

Blisko połowa ankietowanych (45.5%) uznała, iż niedostatek wyszkolonego personelu, jest dla małych i średnich przedsiębiorstw metalowych główną trudnością w ich drodze do cyfrowej transformacji. Przyczyną tego jest niedobór wysoko wykwalifikowanych specjalistów na rynku wraz z koniecznością zapewnienia im wysokiego poziomu wynagrodzeń. Niska znajomość zasad koncepcji wśród badanych firm (31.8%) oraz trudności z określeniem zagrożeń (31.8%), ukazują niedostatek wiedzy jaki przedsiębiorcy wykazują w zrozumieniu rozwoju technologicznego i organizacyjnego możliwego do osiągnięcia w ramach kolejnych rewolucji przemysłowych. Kwestie bezpieczeństwa zostały przez ankietowanych zupełnie niedostrzeżone (0%). Natomiast właściwa ochrona własnych systemów informatycznych, zawierających i przetwarzających ogromne ilości wrażliwych danych, powinna być jednym z priorytetów przy wdrażaniu nowych rozwiązań z zakresu cyfryzacji w przedsiębiorstwach (Lezzi i in., 2018) (Tuptuk & Hailes, 2018) (Corallo i in., 2023).

Dla FAS, jako przedsiębiorstwa dążącego do postępu w swoich wysiłkach związanych z cyfryzacją, uzyskane wyniki badania ankietowego podkreślają znaczenie opracowania i wdrożenia kompleksowych programów edukacyjnych, szkoleniowych i podnoszących świadomość, które wykraczają poza samo doskonalenie umiejętności technicznych pracowników. Chociaż rozwijanie wiedzy technicznej jest niezbędne, aby pracownicy mogli skutecznie zarządzać i obsługiwać zaawansowane technologie cyfrowe, równie ważne jest kształtowanie całościowego zrozumienia szerszego kontekstu transformacji cyfrowej. Obejmuje to zarówno zwiększenie świadomości na temat wyzwań związanych z cyberbezpieczeństwem, jak i wyposażenie pracowników w wiedzę umożliwiającą proaktywne identyfikowanie, ocenianie i łagodzenie tego typu zagrożeń.

Małe i średnie przedsiębiorstwa, takie jak FAS, które wykorzystają potencjał i możliwości jaki niosą ze sobą nowoczesne rozwiązania technologiczne, stoją przed szansą wykonania cyfrowego skoku rozwojowego. Budowa sieci informatycznych integrujących ze sobą maszyny, urządzenia oraz ludzi wzajemnie komunikujących się między sobą, pozwala na zbieranie, przetwarzanie i analizę ogromnej ilości danych, przekraczającą możliwości dotychczas stosowanych rozwiązań. Uzyskiwanie informacji w czasie rzeczywistym (on-line) z przebiegu procesów produkcyjnych, pozwala na usprawnienie pionowej i poziomej komunikacji wewnątrz przedsiębiorstwa, ale także w całym łańcuchu dostaw. Umiejętna interpretacja otrzymywanych danych powinna prowadzić do minimalizowania ryzyka podejmowania błędnych decyzji zarządczych. Zastosowanie w nowoczesnych przedsiębiorstwach, w obszarze produkcji, rozwiązań z zakresu uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji, pozwoli nie tylko przewidywać potencjalne odchylenia od prawidłowego przebiegu procesu produkcyjnego, ale także na bieżąco wprowadzać w nim zmiany, aby do tych negatywnych zmian nie dopuścić. Wzajemna i starannie przeprowadzona integracja dostępnych technologii i rozwiązań organizacyjnych stosowanych w małych i średnich przedsiębiorstwach, w połączeniu z nowoczesnymi osiągnięciami cyfrowymi oraz ich odpowiednim dostosowaniem do specyficznych potrzeb danego przedsiębiorstwa, stanowi kluczowy element osiągnięcia sukcesu biznesowego.

#### 4.2.2. Wyznaczenie strategii przedsiębiorstwa oraz wyznaczenie celów

Dążąc do osiągnięcia sukcesu biznesowego, opracowanie i wprowadzenie jakichkolwiek zmian w dowolnym obszarze działalności każdego przedsiębiorstwa tym bardziej tak znaczących jak budowa i implementacja systemu do adaptacyjnego sterowania produkcją korpusu wodomierza, jak w przypadku FAS, wymaga określenia strategii oraz celów, jakie chce dane przedsiębiorstwo osiągnąć realizując tego typu projekt. Wyznaczenie strategii przedsiębiorstwa oraz określenie jego celów stanowi fundamentalny element zarządzania organizacją, który determinuje jego kierunek, efektywność i zdolność do adaptacji w stale zmieniającym się środowisku biznesowym i produkcyjnym. Strategia przedsiębiorstwa to długoterminowy plan działania, który ukierunkowuje jego rozwój, wyznacza priorytety oraz definiuje sposób osiągania przewagi konkurencyjnej na rynku. Cele przedsiębiorstwa natomiast to konkretne, mierzalne wyniki, które organizacja zamierza osiągnąć w określonym czasie. Proces ten jest nieodzowny dla każdego przedsiębiorstwa, bez względu na jego wielkość, branżę czy etap rozwoju.

Biorąc pod uwagę powyższe, istotne było ustalenie i zweryfikowanie kierunku strategicznego w jakim podąża analizowane przedsiębiorstwo FAS, mające na celu określenie, wyznaczenie oraz zdefiniowanie jego obszarów strategicznych. Wykorzystano do tego pogłębioną analizę SWOT (ang. S – Strengths – mocne strony, W – Weaknesses – słabe strony, O – Opportunities - szanse, T – Threats - zagrożenia) przedsiębiorstwa, nakierowaną na jego rozwój cyfrowy. Poszczególni gestorzy procesów w firmie w większości będący kierownikami poszczególnych komórek organizacyjnych, określili mocne oraz słabe strony, a także szanse i zagrożenia dla badanej organizacji. W dalszej kolejności ankietowana grupa została poproszona, aby w każdej grupie czynników ocenić każdy z nich indywidualnie w skali 1-4, gdzie 1 oznacza czynnik nieistotny, a 4 to najważniejsze znaczenie, co pozwoliło wyciągnąć średnią dla poszczególnych czynników klasyfikujących możliwości przedsiębiorstwa. W ten sposób uzyskano następujące wyniki: S – 3,30; W – 2,88; O – 3,16; T – 3,06. Ich interpretacja wskazuje na przewagę mocnych stron oraz szans, co z kolei predestynuje do określenia i przyjęcia strategii firmy jako agresywnej (maxi-maxi). Polega ona na maksymalnym wykorzystaniu efektu synergii, związanego z mocnymi stronami organizacji, a także szansami płynącymi z jej otoczenia (Kucharczyk & Kardas, 2018). Opracowaną analizę SWOT przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1 Analiza SWOT przedsiębiorstwa FAS

| CZYNNIKI   | POZYTYWNE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | NEGATYWNE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WEWNĘTRZNE | <b>MOCNE STRONY (S):</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- efektywna praca zespołowa</li><li>- otwartość na zmiany i chęć ich wdrażania</li><li>- zaangażowanie najwyższego kierownictwa</li><li>- młoda kadra kierownicza</li><li>- duże doświadczenie i wiedza pracowników w obszarze technologii produkcji</li><li>- nierozbudowany system podejmowania decyzji</li></ul> | <b>SŁABE STRONY (W):</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- brak jednolitego systemu wymiany informacji</li><li>- brak kompleksowego i zintegrowanego systemu informatycznego</li><li>- brak wystarczających zasobów sprzętowych (komputery, serwery)</li><li>- brak wystarczającej infrastruktury sieciowej (switche, routery, okablowanie)</li></ul> |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ZEWNĘTRZNE</b> | <b>SZANSE (O):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- zbudowany szkielet sieci informatycznej FAS</li> <li>- możliwość integracji istniejących rozwiązań informatycznych</li> <li>- dostępność rozwiązań informatycznych zgodnych z koncepcją Przemysłu 4.0</li> <li>- dostępne granty na cyfryzację przedsiębiorstw</li> </ul> | <b>ZAGROŻENIA (T):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- brak gotowych rozwiązań informatyczny przystosowanych do FAS</li> <li>- wybór pewnego (solidnego) dostawcy usług IT</li> <li>- długi okres realizacji projektu</li> <li>- brak systemu bazy wiedzy</li> <li>- rozbudowany projekt systemu informatycznego</li> </ul> |
|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

W przypadku FAS, wizja rozwoju technologicznego i organizacyjnego towarzysząca realizowanemu w ramach niniejszej pracy doktorskiej projektowi, stała się przyczynkiem do opracowania oraz przyjęcia skorygowanej strategii prowadzenia przedsiębiorstwa. W dalszej kolejności było to punktem wyjściowym do określenia głównych celów dla całej organizacji FAS, co w szczególności znalazło bezpośrednie przełożenie również na proces produkcji korpusów wodomierza. Strategia i cele przedsiębiorstwa stanowią podstawę do monitorowania postępów i oceny wyników. Regularne przeglądy i oceny pozwalają na identyfikację obszarów wymagających poprawy oraz dostosowanie działań do zmieniających się warunków rynkowych i wewnętrznych. Skuteczne monitorowanie oraz ocena wyników stała się możliwa dzięki opracowaniu i wyborze kluczowych wskaźników efektywności dotyczących procesu produkcji wodomierza, które szczegółowe zostaną przedstawione w dalszej części pracy.

Mając wyznaczoną strategię i kierunek, w którym podąża FAS, w kolejnym kroku należało określić kluczowe obszary dla działu produkcji. W związku z tym opracowano arkusze wyjściowe dotyczące wskazania celów oraz odpowiadających im potencjalnych wskaźników KPI dla przedsiębiorstwa FAS, gdzie podczas przeprowadzonych badań wyszczególniono obszary: efektywność/organizacja oraz jakość. Dla tak dobranych obszarów, opisano główny kontekst, wyznaczono cele, zdefiniowano kluczowe działania lub etapy w realizacji celu, co dla obszaru efektywność/organizacja zestawiono w załączniku pod numerem Z.2-Z.5, a dla obszaru jakość pod numerem Z.6-Z.9. Opracowano wymagania ilościowo-jakościowe określające stan docelowy i działania, co konkretnie ma zostać zrealizowane, aby osiągnąć cel. Zaproponowano wskaźniki wykonania celu, a także utworzono matrycę RASCI (ang. R - Responsible - Odpowiedzialny, A - Accountable - Zatwierdzający, S - Support - Wspierający, C - Consulted - Konsultujący, I - Informed - Informowany). Taka matryca określa zakres odpowiedzialności, rolę, jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji celu. Weryfikację czy cel został poprawnie wyznaczony, wykonano z wykorzystaniem metody SMARTER (ang. S - Specific - Konkretny, M - Measurable - Mierzalny, A - Attainable - Osiągalny, R - Relevant - Realistyczny, T - Time-bound - Ograniczony w czasie, E - Exciting - Ekscytujący, R - Recorded - Zapisany).

W następnym kroku wykorzystano elementy opisanej wcześniej koncepcji Hoshin Kanri, czyli metody zarządzania strategicznego opartej na prowadzeniu przedsiębiorstwa w ściśle określonym i uzgodnionym kierunku, tzw. True North (kierunek ten został wcześniej zdefiniowany po wykonaniu analizy SWOT). Jednym z jej elementów jest szablon doskonalenia organizacyjnego tzw. X-matrix. Pozwala on na zebranie w jednym miejscu wyznaczonych dla FAS obszarów strategicznych, celów, kluczowych działań/projektów (dzięki opracowanym wcześniej arkuszom wyjściowym) oraz wskaźników. Na podstawie

zdefiniowania siły wpływu poszczególnych składników matrycy na siebie (bezpośrednio, pośrednio, brak oddziaływania), możliwe było wyznaczenie korelacji pomiędzy nimi. Uzyskany obraz pozwalał na precyzyjne zweryfikowanie i wyznaczenie nieistotnych powiązań, a tym samym pominięcie ich w dalszym etapie pracy, a także przede wszystkim określenie tych krytycznie ważnych, skutkujących koniecznością poddania ich pogłębionej analizie, dążącej do wyznaczenia potencjalnych KPI. Co więcej, zbudowana sieć powiązań doskonale pokazywała, które z zaproponowanych kluczowych wskaźników efektywności, oddziałują na większą liczbę kluczowych działań, tym bardziej predestynując je do dalszej ewaluacji. Ostateczny wybór wskaźnika KPI do dalszej pracy, opierał się na spełnieniu kryterium bezpośredniego wpływu na kluczowe działania w liczbie dziesięć lub większej. Opracowany szablon X-matrix dla przedsiębiorstwa FAS, dzięki któremu wytypowano ostateczny zestaw wskaźników KPI, służących walidacji systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza przedstawiono w załączniku pod numerem Z.10.

Skuteczne określenie oraz wybór wskaźników KPI wymagał odpowiedniego przygotowania. W pierwszym etapie należało przeprowadzić dokładną analizę bieżącego stanu procesu w odniesieniu do zdefiniowanych celów zgodnych z przyjętą strategią zarządzania. Do przeprowadzenia takiej analizy należało powołać zespół, którego członkowie reprezentowali wszystkie obszary przedsiębiorstwa. Tak przeprowadzona analiza wyodrębniała:

- obszary istotnie wpływające na cele strategiczne (np. wydajność linii produkcyjnej),
- kluczowe charakterystyki obszarów (np. dostępność maszyn, czasy przebrojeń),
- cechy dla wskazanych charakterystyk (np. czas pracy, liczba braków),
- składowe cech (np. czas awarii, czas kalibracji narzędzia),
- wartości fizyczne cech (np. czas zdiagnozowania przyczyny awarii, czas regeneracji/ zakupu narzędzia) wraz z danymi historycznymi, które umożliwią wyznaczenie wartości granicznych wskaźnika.

Kryteria wyboru wskaźników powinny uwzględniać także poprawność metodologiczną:

- liczba wskaźników nie powinna być zbyt duża, system oparty na mniejszej liczbie wskaźników jest uważany za skuteczniejszy,
- wskaźniki nie powinny być od siebie bezpośrednio zależne tzn. wysoka wartość jednego wskaźnika jest wynikiem niskiej wartości innego np. wzrost wydajności produkcji w odniesieniu do jakości wyrobów,
- wskaźniki powinny mieć bezpośredni wpływ na zdefiniowane cele np. wzrost wartości wskaźnika OEE przekłada się na zwiększenie dostępności i wydajności maszyn i urządzeń.

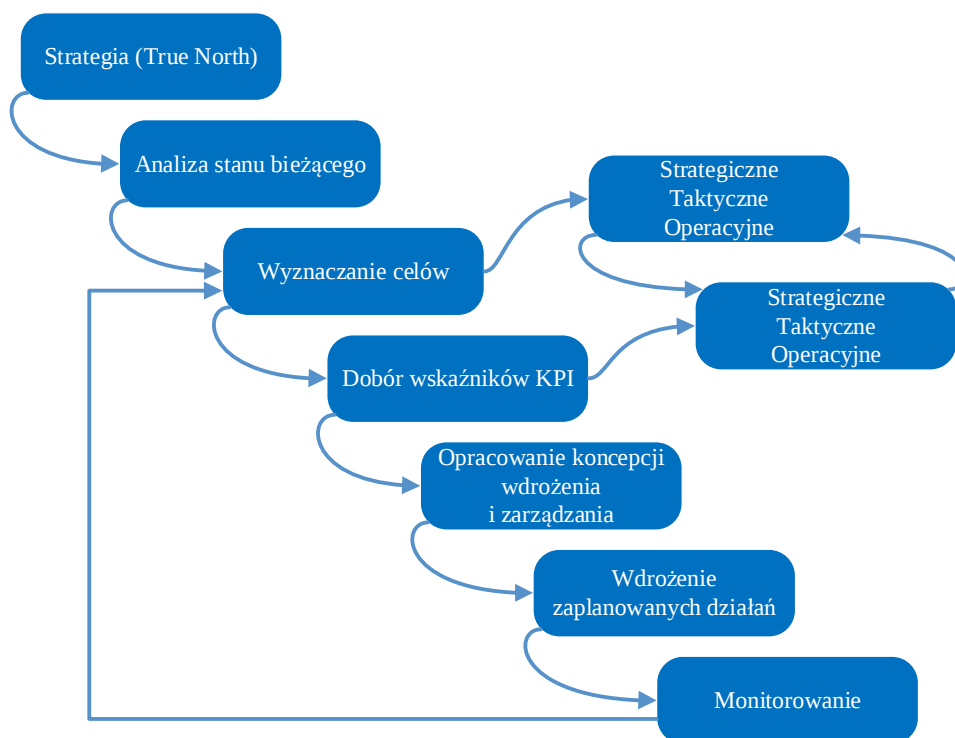
Do każdego wskaźnika powinien być przypisany inżynier (menedżer, operator) odpowiedzialny za jego weryfikację, przeglądy okresowe, kontrolę danych historycznych oraz korektę algorytmów raportowania.

Dla tak wybranych wskaźników dobrą praktyką jest opracowanie metryki, co obejmuje opis:

- zakresu i poziomu oddziaływania wskaźnika na osiągnięcie zdefiniowanych celów strategicznych, taktycznych i operacyjnych,
- dokładności i precyzji odwzorowania stanu procesu na poszczególnych poziomach decyzyjnych i obszarach oddziaływania,
- poszczególnych składowych wskaźnika wpływających na jego efektywność poprzez zdefiniowanie skali oceny oraz wartości bazowych i docelowych,
- typu wskaźnika: jego nazwę, jednostkę pomiaru oraz źródła danych w poszczególnych punktach monitorowania wskaźnika.

Po przeprowadzonej analizie należało zawęzić jej zakres do najistotniejszych aspektów: obszarów, charakterystyk i cech np. poprzez dzięki wykorzystaniu diagramu Pareto-Lorenza. Zbyt duża liczba danych mogła negatywnie wpłynąć na wybór odpowiednich wskaźników. Zapis danych z analizy w postaci tabel opisujących poszczególne obszary, cechy i charakterystyki umożliwił ich późniejszą weryfikację w zgodności z cechami wybranych wskaźników. Jedną z metod obrazującą całą strukturę modelu zarządzania wskaźnikami była wizualizacja poszczególnych aspektów w postaci hierarchicznego diagramu powiązań. Taki diagram stanowił jeden z głównych szkieletów dla zintegrowanego systemu informatycznego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza, w tym wspomagającego zarządzanie strukturą wskaźników.

Wdrażanie systemu opartego na wskaźnikach jest procesem długotrwałym, dlatego wymaga opracowania planu. Plan powinien zostać podzielony na etapy ze zdefiniowanymi celami i założeniami. Każdy etap powinien mieć wyznaczone ramy czasowe oraz kamienie milowe. Na rysunku 4.9 przedstawiono schemat postępowania – etapy wdrażania systemu opartego na wskaźnikach KPI.



Rys. 4.9 Schemat postępowania – etapy wdrażania systemu opartego na wskaźnikach KPI

Wyznaczenie strategii przedsiębiorstwa oraz jego celów jest niezbędnym elementem skutecznego zarządzania, który wspiera kierowanie działaniami przedsiębiorstwa, usprawnia wykorzystywanie zasobów, wzmacnia zaangażowanie pracowników oraz umożliwia elastyczne reagowanie na zmieniające się warunki rynkowe. Dzięki wykorzystaniu takiego podejścia w FAS oraz wykorzystaniu zaproponowanej metodyki postępowania zaprojektowano model systemu wspomagającego procesy decyzyjne oparty na kluczowych wskaźnikach efektywności, będący częścią składową zintegrowanego systemu informatycznego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza.

#### 4.2.3. Model hierarchicznej struktury wskaźników wspomagający proces adaptacyjnego sterowania produkcją

Efektem wykorzystania przedstawionego wcześniej toku postępowania, było wyznaczenie zbioru wskaźników, ściśle odpowiadającego potrzebom FAS oraz wpisującego się w transformację cyfrową, jaką dzięki temu przeszło badane przedsiębiorstwo, zawierającego się w analizowanych obszarach efektywności/organizacji oraz jakości. W związku ze spełnieniem kryterium bezpośredniego wpływu na kluczowe działania w liczbie dziesięć lub większej, zgodnie z zaprezentowanym szablonem X-matrix, monitorowaniu będą podlegały trzy wybrane w ten sposób wskaźniki:

- LT – (ang. Lead Time) - czas przejścia materiału w procesie - wskaźnik efektywności/organizacji,
- SC – (ang. Scrap Ratio) - wskaźnik braków - wskaźnik jakościowy,
- OEE – (ang. Overall Equipment Effectiveness = Availability \* Effectiveness \* Quality ratio) - Ogólna Efektywność Wyposażenia = Dostępność \* Wydajność \* Jakość - wskaźnik efektywności/organizacji.

Wyznaczone wskaźniki są odpowiedzią na bieżące wyzwania, z jakimi mierzy się analizowane przedsiębiorstwo, a ich wdrożenie i monitorowanie ma służyć ocenie stanu procesu produkcji na zdefiniowanych poziomach decyzyjnych: strategicznym, taktycznym i operacyjnym. Poszczególne KPI odpowiadają rzeczywiście zdiagnozowanym problemom, które zestawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2 Zestawienie KPI oraz odpowiadające im problemy produkcyjne w przedsiębiorstwie FAS

| L.p. | KPI | Opis problemu                                                                                                                                         |
|------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.   | LT  | Niedopasowanie harmonogramu produkcji do zamówień składanych przez klientów                                                                           |
| 2.   | SC  | Zdarzające się okresowe wzrosty poziomu wyrobów wadliwych                                                                                             |
| 3.   | OEE | Brak informacji o wyniku korelacji pomiędzy dostępnością, wykorzystaniem a uzyskaną jakością wyrobów dla wybranych procesów i stanowisk produkcyjnych |

Zaproponowane kompleksowe podejście obejmujące istotne fragmenty prowadzonej działalności biznesowej FAS ma za zadanie wprowadzenie modyfikacji i usprawnień do procesów sterowania procesem produkcji. Każda organizacja, aby móc sprawnie funkcjonować, powinna opierać swoją działalność na rzetelnie zebranych oraz opracowanych danych. Stąd też samo poprawne wyznaczenie wskaźników, chociaż jest zadaniem absolutnie kluczowym, nie przyniesie pożądanych efektów, bez rzetelnego zdefiniowania standardu opisu

wskaźnika. Taka metryka jak już zasygnalizowano wcześniej, powinna zawierać szereg informacji odnoszących się zarówno do precyzyjnie określonego samego KPI, ale także do warunków związanych z otoczeniem w jakich będzie on funkcjonował (ISO 22400-1:2014(E), 2014) (ISO 22400-2:2014(E), 2014) (PN-EN 15341:2019-12, 2019). Z tego też powodu w ramach przeprowadzonych badań, zaprojektowano kompleksowy arkusz, podzielony na trzy zasadnicze części, a składający się z: charakterystyki podstawowej (nazwa wskaźnika, czego dotyczy, definicja, obszar oddziaływania, właściciel, wzór obliczeniowy), charakterystyki szczegółowej (sposób pomiaru, źródło pochodzenia wartości mierzonej, jednostka miary, zakres wartości, trend, częstotliwość pomiaru) oraz raportowania (częstotliwość raportowania, miejsce raportowania, poziomy alarmowe, działania korygujące, sposób prezentacji). Umożliwia to każdej zainteresowanej osobie na szybkie zapoznanie się ze zbudowanym systemem wskaźników funkcjonującym w przedsiębiorstwie FAS, a także jest doskonałą bazą wyjściową, pod przyszłe jego modyfikacje, wynikające ze zmieniającego się otoczenia lub po prostu chęci poprawienia jego działania. Opracowane metryki dla wskaźników LT, SC i OEE przedstawiono odpowiednio w tabelach 4.3-4.5.

Tab. 4.3 Metryka opisu wskaźnika LT

| <b>Charakterystyka podstawowa</b>  |                                                                                                                          |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.                                 | Nazwa wskaźnika:<br>LT (Lead Time) – czas przejścia materiału w procesie                                                 |
| 2.                                 | Czego dotyczy:<br>Zarządzania przepływem materiałów                                                                      |
| 3.                                 | Definicja wskaźnika:<br>Czas od dostawy materiału wejściowego do magazynu do dostarczenia wyrobu gotowego do klienta     |
| 4.                                 | Obszar oddziaływania:<br>jednostka robocza, produkt, okres czasu, wydział produkcyjny, logistyka wewnętrzna              |
| 5.                                 | Właściciel:<br>Szef Produkcji                                                                                            |
| 6.                                 | Wzór obliczeniowy:<br>$LT = \text{termin dostawy do klienta} - \text{termin dostawy materiału do produkcji do magazynu}$ |
| <b>Charakterystyka szczegółowa</b> |                                                                                                                          |
| 7.                                 | Sposób pomiaru:<br>wykonanie VSM, statystyka ze zleceń produkcyjnych                                                     |
| 8.                                 | Źródło pochodzenia wartości mierzonej:<br>zlecenie produkcyjne, oprogramowanie komputerowe, mapa przepływu VSM           |
| 9.                                 | Jednostka miary:<br>h                                                                                                    |
| 10.                                | Zakres wartości:<br>Min: 0<br>Max: nieograniczony                                                                        |
| 11.                                | Trend (cel):<br>im niższa wartość, tym lepiej                                                                            |
| 12.                                | Częstotliwość pomiaru:<br>na żądanie – nie rzadziej niż raz na kwartał                                                   |

| Raportowanie |                                                                      |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| 13.          | Częstotliwość raportowania:<br>min. raz na kwartał                   |
| 14.          | Miejsce raportowania:<br>nadzór produkcyjny, zarząd przedsiębiorstwa |
| 15.          | Poziomy alarmowe:<br>>200 h                                          |
| 16.          | Działania korygujące:<br>spotkanie kierowników działów               |
| 17.          | Sposób prezentacji:<br>tabela, dashboard, mapa VSM                   |

Tab. 4.4 Metryka opisu wskaźnika SC

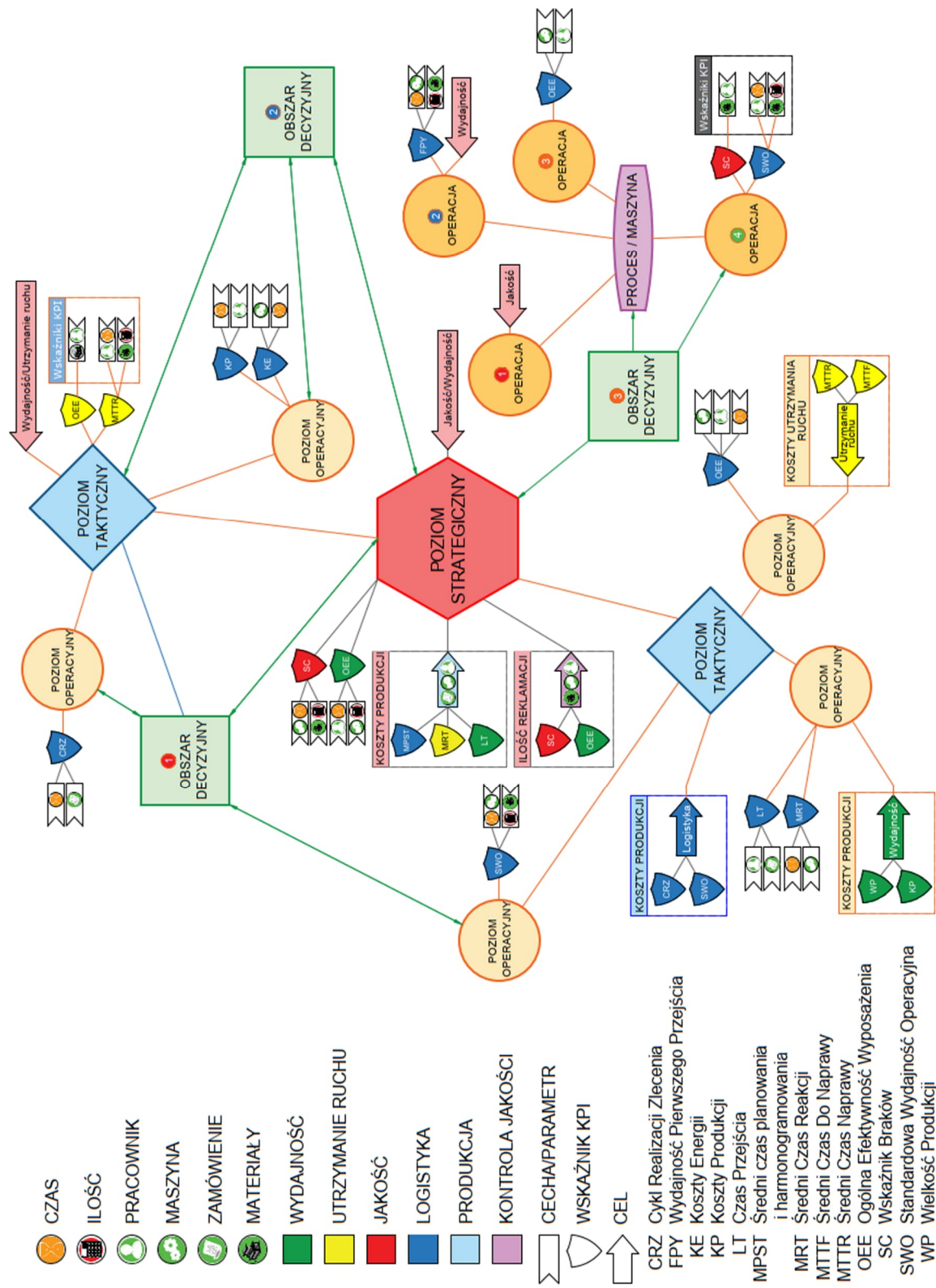
| Charakterystyka podstawowa  |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.                          | Nazwa wskaźnika:<br>SC (Scrap ratio) – wskaźnik braków                                                                                                        |
| 2.                          | Czego dotyczy:<br>zapobieganiu powstawania wyrobów brakowych                                                                                                  |
| 3.                          | Definicja wskaźnika:<br>Zależność między ilością wyrobów brakowych (SQ - Scrap Quantity), a całkowitą ilością wyprodukowaną wyrobów (PQ - Produced Quantity). |
| 4.                          | Obszar oddziaływania:<br>jednostka robocza, produkt, zlecenie produkcyjne, wydział produkcyjny, kontrola jakości                                              |
| 5.                          | Właściciel:<br>Szef Produkcji                                                                                                                                 |
| 6.                          | Wzór obliczeniowy:<br>$SC = SQ / PQ$                                                                                                                          |
| Charakterystyka szczegółowa |                                                                                                                                                               |
| 7.                          | Sposób pomiaru:<br>statystyka ze zleceń produkcyjnych                                                                                                         |
| 8.                          | Źródło pochodzenia wartości mierzonej:<br>zlecenie produkcyjne, system ERP                                                                                    |
| 9.                          | Jednostka miary:<br>%                                                                                                                                         |
| 10.                         | Zakres wartości:<br>Min: 0%<br>Max: 100%                                                                                                                      |
| 11.                         | Trend (cel):<br>im niższa wartość, tym lepiej                                                                                                                 |
| 12.                         | Częstotliwość pomiaru:<br>na koniec zlecenia produkcyjnego                                                                                                    |
| Raportowanie                |                                                                                                                                                               |
| 13.                         | Częstotliwość raportowania:<br>okresowo – co 1 miesiąc                                                                                                        |
| 14.                         | Miejsce raportowania:<br>operator, nadzór produkcyjny, zarząd przedsiębiorstwa                                                                                |
| 15.                         | Poziomy alarmowe:<br>>0.5%                                                                                                                                    |

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| 16. | Działania korygujące:         |
|     | spotkanie kierowników działów |
| 17. | Sposób prezentacji:           |
|     | tabela, dashboard             |

Tab. 4.5 Metryka opisu wskaźnika OEE

| Charakterystyka podstawowa  |                                                                                                                                               |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.                          | Nazwa wskaźnika:<br>OEE (Overall equipment effectiveness) – ogólna efektywność wyposażenia                                                    |
| 2.                          | Czego dotyczy:<br>Efektywność - korelacja pomiędzy dostępnością, wykorzystaniem a uzyskaną jakością dla stanowisk/gniazd/linii produkcyjnych  |
| 3.                          | Definicja wskaźnika:<br>Dostępność jednostki roboczej, skuteczność jednostki roboczej oraz wskaźniki jakości zintegrowane w jednym wskaźniku. |
| 4.                          | Obszar oddziaływania:<br>jednostka robocza, produkt, okres czasu, wydział produkcyjny, kontrola jakości                                       |
| 5.                          | Właściciel:<br>Szef Produkcji                                                                                                                 |
| 6.                          | Wzór obliczeniowy:<br>$OEE = \text{Dostępność} * \text{Wydajność} * \text{Jakość}$                                                            |
| Charakterystyka szczegółowa |                                                                                                                                               |
| 7.                          | Sposób pomiaru:<br>statystyka ze zleceń produkcyjnych, monitoring on-line                                                                     |
| 8.                          | Źródło pochodzenia wartości mierzonej:<br>zlecenie produkcyjne, system ERP, system Golem                                                      |
| 9.                          | Jednostka miary:<br>%                                                                                                                         |
| 10.                         | Zakres wartości:<br>Min: 0%<br>Max: 100%                                                                                                      |
| 11.                         | Trend (cel):<br>im wyższa wartość, tym lepiej                                                                                                 |
| 12.                         | Częstotliwość pomiaru:<br>on-line, na koniec zlecenia produkcyjnego                                                                           |
| Raportowanie                |                                                                                                                                               |
| 13.                         | Częstotliwość raportowania:<br>okresowo – co 1 miesiąc                                                                                        |
| 14.                         | Miejsce raportowania:<br>operator, nadzór produkcyjny, zarząd przedsiębiorstwa                                                                |
| 15.                         | Poziomy alarmowe:<br><70%                                                                                                                     |
| 16.                         | Działania korygujące:<br>spotkanie kierowników działów                                                                                        |
| 17.                         | Sposób prezentacji:<br>tabela, dashboard                                                                                                      |

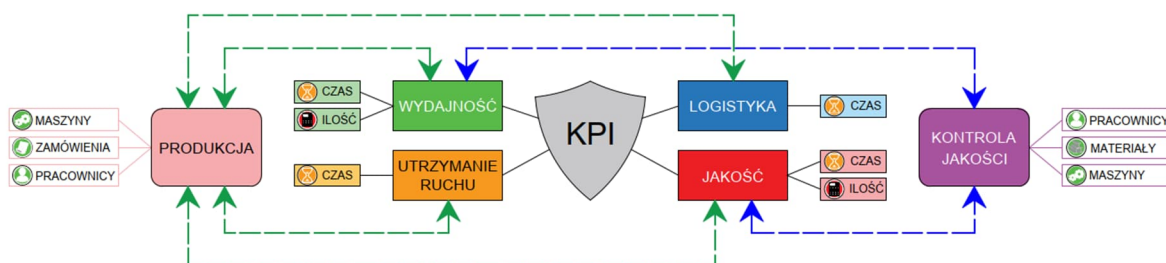
Opracowana struktura modelu zarządzania wskaźnikami odzwierciedla hierarchiczną strukturę poziomów zarządzania i jest przedstawiona na rysunku 4.10.



Rys. 4.10 Struktura hierarchicznego modelu zarządzania wskaźnikami

Każdy węzeł struktury możemy opisać w sposób obiektowy, przypisując mu parametry i atrybuty istotne dla każdego poziomu zarządzania oraz cechy powiązane z obszarami przedsiębiorstwa. Atrybuty obiektów umożliwią utworzenie punktów agregujących informacje na poszczególnych poziomach i obszarach zarządzania. Taka struktura umożliwia powiązanie wskaźników z atrybutami obiektów i weryfikację oddziaływania wskaźników na zdefiniowane cele zarządzania. Dodatkowym atutem takiego rozwiązania jest wykrywanie korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami wskaźników.

Przedstawiona struktura hierarchicznego modelu zarządzania wskaźnikami jest modelem uniwersalnym, tak samo jak zaproponowana metodyka wdrażania całego systemu opartego na wskaźnikach. Z tego względu nadaje się do wykorzystania w dowolnym przedsiębiorstwie. Doskonale jest to przedstawione na opracowanym schemacie, gdzie do konkretnych poziomów decyzyjnych (strategiczny, taktyczny, operacyjny) możliwe jest ustanowienie wielu celów dotyczących różnych obszarów/działów przedsiębiorstwa (wydajność, utrzymanie ruchu, jakość, logistyka, produkcja, kontrola jakości), monitorowanych za pomocą odpowiednio dobranych KPI. Mogą to być zarówno LT, SC, OEE (jak w przypadku FAS) jak i dowolne inne skutecznie spełniające postawione przed nimi zadania jak dla przykładu te związane z obszarem utrzymania ruchu: MRT (ang. Mean Reaction Time) – średni czas reakcji, MTTF (ang. Mean Time To Failure) – średni czas do naprawy, MTTR (ang. Mean Time To Repair) – średni czas naprawy. Co ważne, dla każdego KPI możliwe jest przypisanie cechy, która go charakteryzuje (np. materiały, zamówienia) jak i parametru, za pomocą którego jest on monitorowany (np. liczba, czas). Powiązanie wskaźnika KPI z poszczególnymi obszarami oddziaływania na proces produkcyjny przedstawiono na rysunku 4.11.



Rys. 4.11. Powiązanie wskaźników KPI z poszczególnymi obszarami oddziaływania na proces produkcyjny

Wykonana analiza bieżącego stanu procesu oraz wybrane na jej podstawie odpowiednie wskaźniki KPI umożliwiły zbudowanie oraz w dalszej kolejności walidację zintegrowanego systemu informatycznego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, wspomagającego zarządzanie i doskonalenie całej struktury wskaźników obejmującego swym zasięgiem wybrane stanowiska decyzyjne. Zarządzanie wskaźnikami bez systemu informatycznego, jak wskazuje doświadczenie jest w 90% skazane na porażkę (Klonowski, 2004). Opracowany zintegrowany system informatyczny, aby być skuteczny powinien zawierać: algorytmy obliczeń wskaźników (w tym metody agregacji i propagacji wartości do wyższych poziomów decyzyjnych), system powiadamiania (a także ostrzegania przed wartościami krytycznymi), czytelną i precyzyjną wizualizację wskaźnika oraz być dostępny na każdym stanowisku decydenta. Powinien także zawierać procedury umożliwiające weryfikację zgodności

wskaźnika z założeniami projektowymi oraz zapewnić walidację struktury wskaźnika z wynikami analizy stanu bieżącego.

Powyższe opracowanie stanowiło podstawę do zdefiniowania założeń dla zintegrowanego systemu informatycznego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusów wodomierza, umożliwiającego wspomaganie procesu decyzyjnego, a także monitorującego wyznaczone cele we wskazanych obszarach funkcjonowania przedsiębiorstwa oraz na poszczególnych poziomach decyzyjnych, które obejmowały:

- przemodelowanie formularzy rejestracji zadań produkcyjnych: rejestracja dodatkowych informacji (parametry dla wskaźników), automatyzacja wprowadzania danych (RFID, kody QR), weryfikacja danych wprowadzanych przez operatora, dodatkowe terminale dostępu do danych (komputery POS, tablety i telefony komórkowe), monitory do wizualizacji danych,
- rozbudowę bazy danych o dodatkowe obiekty (tabele i widoki): rejestracja parametrów wskaźników KPI, automatyczne generowanie raportów i zestawień, generowanie powiadomień i alertów,
- dodatkowe moduły dla urządzeń zbierania danych i rejestracji czasu pracy: układy zliczające dla wyrobów na stanowiskach pracy, czytniki rejestracji czasu pracy maszyn (Golem) i operatorów (karty RFID),
- zmiany organizacyjne związane z:
  - rejestracją zadań realizowanych przez operatorów maszyn,
  - procesami logistycznymi - logistyka na produkcji, logistyka utrzymania ruchu,
  - planowaniem produkcji - harmonogramowanie zleceń produkcyjnych,
  - zarządzaniem projektami - nowe uruchomienia,
  - kontrolą jakości - kontrola pierwszej sztuki, rejestracja braków,
  - utrzymaniem ruchu - obsługa awarii i konserwacji.

#### **4.2.4. Identyfikacja parametrów systemu produkcyjnego korpusu wodomierza na potrzeby repliki cyfrowej**

Identyfikacja parametrów systemu produkcyjnego korpusu wodomierza na potrzeby repliki cyfrowej stanowiła fundamentalne zadanie w budowie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania tym procesem. W ramach tego zadania skoncentrowano się na dwóch rodzajach parametrów: sterowalnych i wynikowych. Sterowalne parametry w procesie produkcyjnym to te zmienne, które można świadomie i celowo nastawiać lub regulować w celu osiągnięcia zamierzonego efektu w trakcie przeprowadzania operacji technologicznej jakim jest uzyskanie dobrego wyrobu zgodnie z postawionymi przed nim wymaganiami. Są to czynniki, które mają bezpośredni wpływ na przebieg procesu i efekty końcowe wytwarzania. Sterowanie tymi parametrami umożliwia dostosowanie procesu do zmieniających się warunków, poprawę efektywności, a także minimalizację błędów i wad w produkcie końcowym. Wynikowe parametry w procesie produkcyjnym to z kolei te zmienne, które charakteryzują efekty końcowe danej operacji lub całego procesu wytwarzania. Są to obserwowalne i mierzalne cechy, które opisują jakość lub inne istotne właściwości produktu końcowego jakim w badanym przypadku jest korpus wodomierza. Wynikowe parametry stanowią rezultat

oddziaływań sterowalnych parametrów oraz różnych czynników wpływających na proces produkcyjny. W kontekście produkcji korpusu wodomierza, przykłady wynikowych parametrów obejmują, m.in. wymiary geometryczne, jakość powierzchni, trwałość mechaniczną, szczelność czy też inne cechy fizyczne i funkcjonalne wyrobu końcowego. Każda z operacji technologicznych generuje różnorodne parametry wynikowe, które są istotne dla oceny efektywności danego procesu oraz zgodności z założeniami projektowymi.

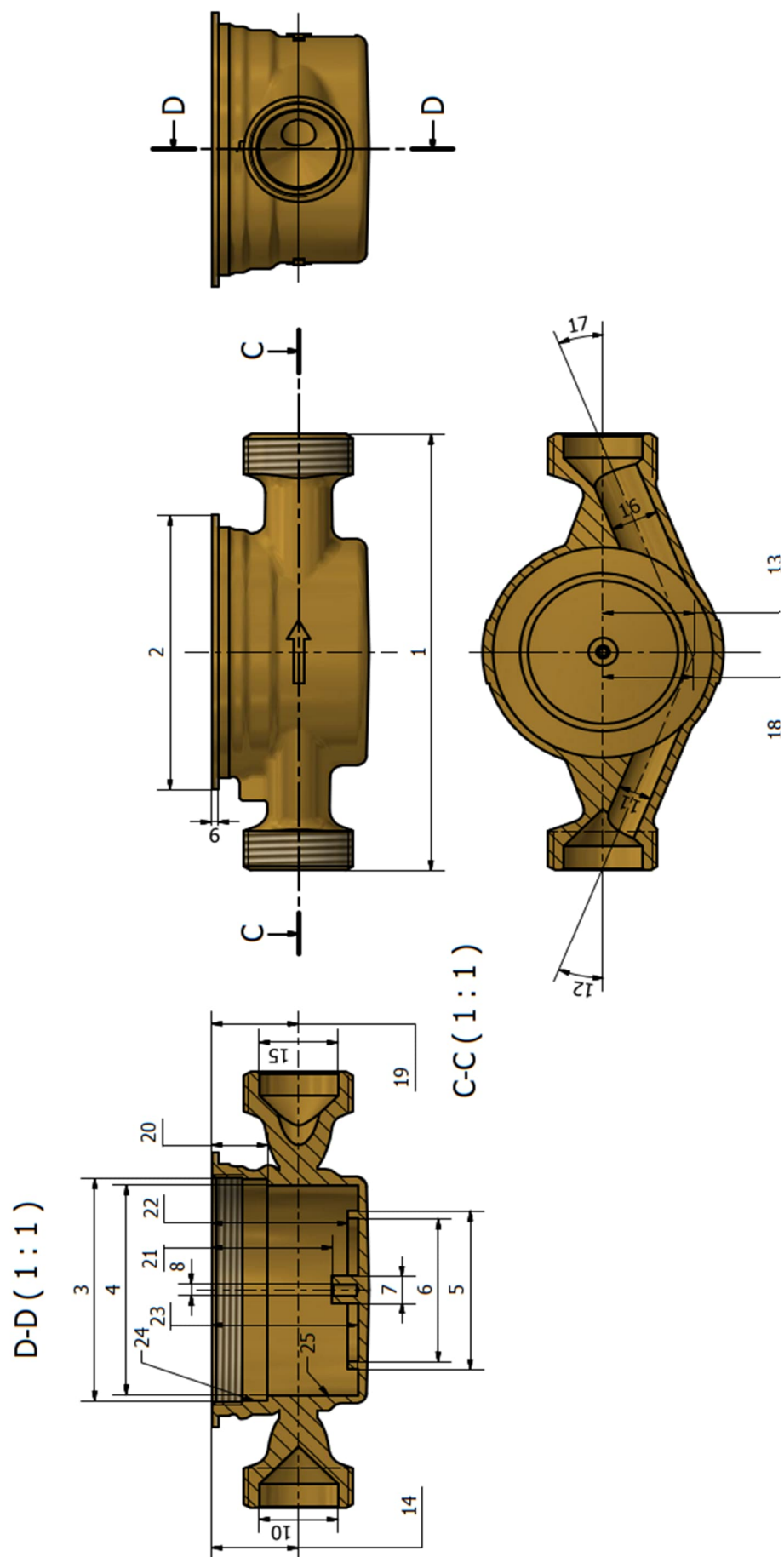
Identyfikacja i monitorowanie wynikowych parametrów jest niezbędna dla zapewnienia jakości produktu końcowego. W trakcie procesu produkcji, kontrola tych parametrów umożliwia wykrywanie ewentualnych odchyłeń od normy, co pozwala na szybkie reagowanie i wprowadzanie korekt (adaptacyjne sterowanie procesem). Wynikowe parametry są również istotne w kontekście ciągłego doskonalenia procesu, umożliwiając analizę skuteczności wprowadzanych zmian oraz dostosowanie parametrów sterowalnych w celu osiągnięcia zamierzonych rezultatów. Efektem końcowym dla tego etapu badań był zdefiniowany zestaw parametrów procesowych i charakterystyk krytycznych dla poszczególnych operacji technologicznych, na które składa się wyodrębniony model procesu produkcji korpusu wodomierza w warunkach operacyjnych.

Identyfikacja parametrów procesowych w produkcji korpusu wodomierza obejmowała z kolei uwzględnienie złożoności tego procesu wykorzystującego różnorodne techniki wytwarzania. Zrozumienie istoty i znaczenia parametrów procesowych w poszczególnych operacjach technologicznych, a także ich wpływu na wymiary geometryczne pozwoliło na skuteczne kontrolowanie efektywności procesu produkcji korpusu wodomierza na każdym jego etapie. Posiadana wiedza ekspercka dotycząca procesu produkcji korpusów wodomierza stała się fundamentem dla precyzyjnego wyznaczenia i identyfikacji kluczowych parametrów procesowych. Bieżąca analiza tych parametrów pozwala na wczesne wykrywanie odchyłeń i potencjalnych problemów, co umożliwia podjęcie działań prewencyjnych, a jednocześnie wspiera podejmowanie świadomych decyzji dotyczących modyfikacji procesu i wdrażania nowych technologii. W ten sposób identyfikacja parametrów procesowych staje się fundamentem skutecznego zarządzania produkcją, gwarantującą lepsze zrozumienie i kontrolę nad całym cyklem produkcyjnym. Przykładowo w operacji cięcia, gdzie kontrolowane jest czy masa wstępniaka jest odpowiednia, w procesie kucia matrycowego wpływa ona na poprawne wypełnienie wykroju matrycy oraz m.in. na uzyskanie odpowiedniej grubości dna odkuwki. To z kolei wpływa na efektywność procesu obróbki skrawaniem (im grubsze dno tym dłuższy czas skrawania) oraz na operacje montażowe, gdzie skuteczność ich realizacji jest wprost skorelowana właśnie m.in. z grubością dna odkuwki. Wiele milionów sztuk korpusów wodomierza wyprodukowanych dotychczas w przedsiębiorstwie FAS oraz zdobyta w ten sposób wiedza praktyczna umożliwiły skoncentrowanie się na najistotniejszych czynnikach wpływających na jakość i efektywność tego procesu produkcji. Dzięki temu możliwe stało się wypracowanie, uszczegółowienie i ograniczenie listy parametrów procesowych oraz charakterystyk krytycznych (wielkości pomiarowych) dotyczącej poszczególnych operacji technologicznych do tych najbardziej kluczowych, których monitorowanie i analiza pozwoli w sposób najbardziej efektywny wpływać na cały proces produkcyjny korpusów wodomierza. Listę wytypowanych parametrów, pozwalających na ocenę procesu, przypisanych do

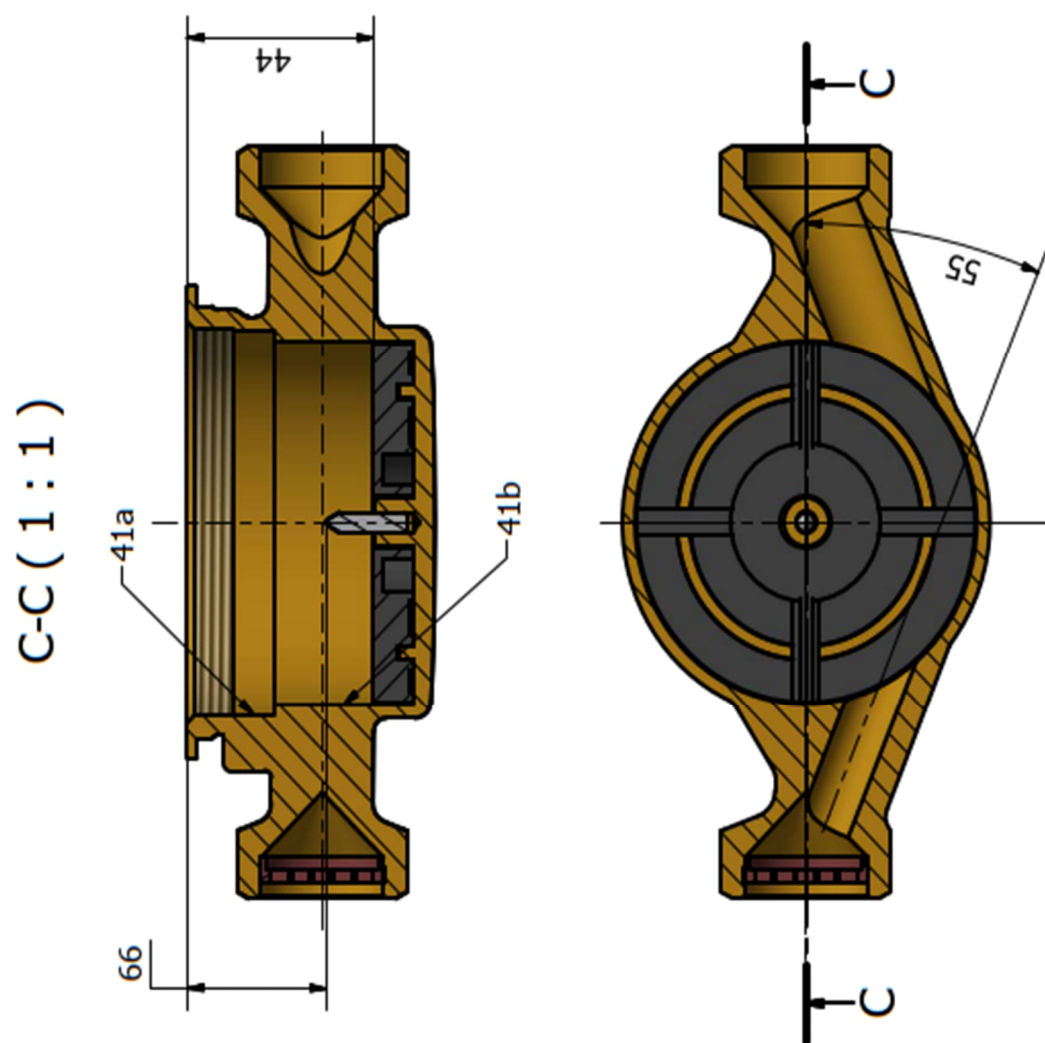
poszczególnych operacji technologicznych zestawiono w załączniku pod numerami Z.11 – Z.20. Wyróżnik **Node Id** lub **Name** służy do rozpoznawania ścieżki dostępu do parametru przez system monitorujący, **Display Name**, **Description**, **Oznaczenie cechy** jest opisem parametru, który w przypadku operacji montażu korpusów wodomierza jest zawarty w kolumnie o nazwie **Opis**, ze względu na jego przetłumaczenie na język polski. **Value** z kolei charakteryzuje jednostkę miary lub status, a **Datatype** odnosi się do rodzaju danych, które mogą być przechowywane w zmiennej lub polu. Listę wytypowanych charakterystyk krytycznych zestawiono natomiast w tabeli 4.6 (gdzie, „\*” oznacza wartość mierzoną ręcznie). Umiejscowienia badanych charakterystyk krytycznych w korpusie wodomierza przedstawiono natomiast na rysunkach 4.12 i 4.13.

Tab. 4.6 Pozyskiwane charakterystyki krytyczne korpusu wodomierza

| Operacja                                      | L.p. | Wielkość mierzona                                             |
|-----------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Cięcie - przedkuwka</b>                    |      | <i>masa wstępniaka*</i>                                       |
| <b>Kucie matrycowe - odkuwka</b>              |      | <i>grubość dna*</i>                                           |
|                                               |      | <i>wymiar przez podział: średnica zewnętrzna najmniejsza*</i> |
| <b>Śrutowanie – odkuwka oczyszczona</b>       |      | -                                                             |
| <b>Obróbka skrawaniem – odkuwka obrobiona</b> | 1    | Długość całkowita                                             |
|                                               | 2    | Średnica kołnierza                                            |
|                                               | 3    | Średnica pod gwintem                                          |
|                                               | 4    | Średnica komory                                               |
|                                               | 5    | Średnica zewnętrzna występu                                   |
|                                               | 6    | Średnica wewnętrzna występu                                   |
|                                               | 7    | Średnica czopa                                                |
|                                               | 8    | Średnica otworka                                              |
|                                               | 9    | Kołnierzyk                                                    |
|                                               | 10   | Średnica                                                      |
|                                               | 11   | Średnica                                                      |
| <b>Wlot</b>                                   | 12   | Kąt wlotu                                                     |
|                                               | 13   | Odległość od komory                                           |
|                                               | 14   | Odległość od kołnierza                                        |
|                                               | 15   | Średnica                                                      |
|                                               | 16   | Średnica                                                      |
| <b>Wylot</b>                                  | 17   | Kąt wylotu                                                    |
|                                               | 18   | Odległość od komory                                           |
|                                               | 19   | Odległość od kołnierza                                        |
|                                               | 20   | Głębokość do półki                                            |
|                                               | 21   | Głębokość do czopa                                            |
| <b>Pozostale</b>                              | 22   | Głębokość do występu                                          |
|                                               | 23   | Głębokość do dna                                              |
|                                               | 24   | Bicie 56 do 2,9                                               |
|                                               | 25   | Bicie 53 do 2,9                                               |
| <b>Odbiór i paletyzacja</b>                   |      | -                                                             |
| <b>Montaż – korpus zmontowany</b>             | 41a  | Bicie 56 do 2,9                                               |
|                                               | 41b  | Bicie 53 do 2,9                                               |
|                                               | 44   | Głębokość do płyty spiętrzającej                              |
|                                               | 55   | Kąt położenia płyty                                           |
|                                               | 66   | Wysokość osadzenia ośki*                                      |



Rys. 4.12 Umiejscowienia badanych charakterystyk krytycznych w korpusie wodomierza po obróbce skrawaniem



Rys. 4.13 Umiejscowienia badanych charakterystyk krytycznych w korpusie wodomierza po montażu

Precyzyjna identyfikacja parametrów mierzalnych pozwala na ścisłą kontrolę efektywności poszczególnych etapów produkcji natomiast zrozumienie i identyfikacja parametrów sterowalnych umożliwia elastyczne dostosowanie ustawień maszyn i regulacji procesów do zmiennych warunków produkcyjnych. Świadome zarządzanie sterowalnymi parametrami pozwala na redukcję czasu trwania poszczególnych etapów produkcji, a także przyczynia się do eliminacji błędów i wad na wczesnym etapie produkcji skracając czas potrzebny do poprawy procesu. Jednocześnie, monitorowanie parametrów mierzalnych wpływających na ilość odpadów surowcowych umożliwia minimalizację strat materiałowych, a skuteczna identyfikacja optymalnych warunków produkcji przyczynia się do efektywnego wykorzystania surowców. Identyfikacja parametrów mierzalnych pozwala na utrzymanie zgodności wyrobów z normami jakościowymi i regulacjami branżowymi, a korzystanie z kompleksowej bazy danych wynikowych i mierzalnych umożliwia ciągłą analizę procesu produkcyjnego oraz stwarza możliwości ciągłego doskonalenia i dostosowywanie procesu do nowych wyzwań i trendów rynkowych.

#### **4.2.5. Model decyzyjny do adaptacyjnego sterowania produkcją i oceny jakości procesu oraz wyrobu**

W celu budowy zintegrowanego systemu informatycznego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza niezbędne było sformułowanie wymagań, a także opracowanie i weryfikacja przemysłowa modelu decyzyjnego w cyfrowym odwzorowaniu tego procesu. Modele decyzyjne tworzy się w celu ustrukturyzowania i usprawnienia procesu podejmowania decyzji, szczególnie w sytuacjach złożonych i obarczonych ryzykiem. Pozwalają one na analizę różnych scenariuszy, identyfikację czynników wpływających na wynik decyzji oraz ocenę potencjalnych konsekwencji różnych działań. Dzięki modelom decyzyjnym możliwe jest zredukowanie niepewności, co prowadzi do podejmowania bardziej świadomych, uzasadnionych i racjonalnych decyzji. Modele decyzyjne ułatwiają również komunikację i współpracę w zespołach, gdyż przedstawiają proces decyzyjny w sposób logiczny i przejrzysty. Modele decyzyjne są więc narzędziem, które pomaga przedsiębiorstwom, organizacjom i jednostkom osiągać swoje cele, minimalizując ryzyko i maksymalizując efektywność podejmowanych działań.

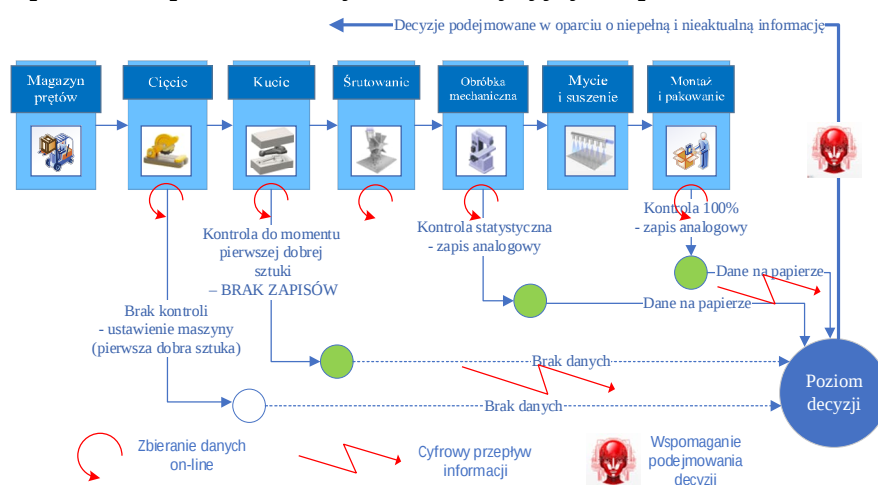
W ramach przeprowadzonych badań opracowano dedykowany model decyzyjny do planowania i adaptacyjnego sterowania produkcją, a także oceny jakości procesu i wyrobu na poczet budowy cyfrowego odwzorowania procesu produkcji korpusu wodomierza. W efekcie powstał zbiór reguł i zasad umożliwiający adaptacyjne sterowanie produkcją, zbiór narzędzi i metod umożliwiający ocenę stanu procesu i jakości wyrobu. Integracją został objęty szeroki wachlarz rozwiązań dotyczących oceny stanu procesu i wyrobu uwzględniający różnorodną zaawansowaną technologię produkcji stosowaną w FAS. Model powstał na bazie metod heurystycznych oraz wielokryterialnych metod wspomagania decyzji. Końcowym wynikiem dla tej części badań było opracowanie bazy wiedzy i modelu analizowania tej wiedzy, co w efekcie ma dążyć do wskazania najlepszej decyzji operacyjnej dla zadanych uwarunkowań systemu produkcyjnego i pod względem przyjętych kryteriów.

Wyzwaniem dla przeprowadzonych prac było dobranie odpowiedniego zestawu narzędzi sterowania w taki sposób, aby umożliwić skuteczną integrację danych, informacji oraz zdarzeń z wielu stanowisk produkcyjnych, uwzględniając stosowane w nich różnorodne techniki wytwarzania. Założeniem było uzyskanie możliwości oceny stanu procesu w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem wielu czynników związanych z procesem, wyrobem i ich otoczeniem, co zostało poddane walidacji i skutecznie osiągnięte.

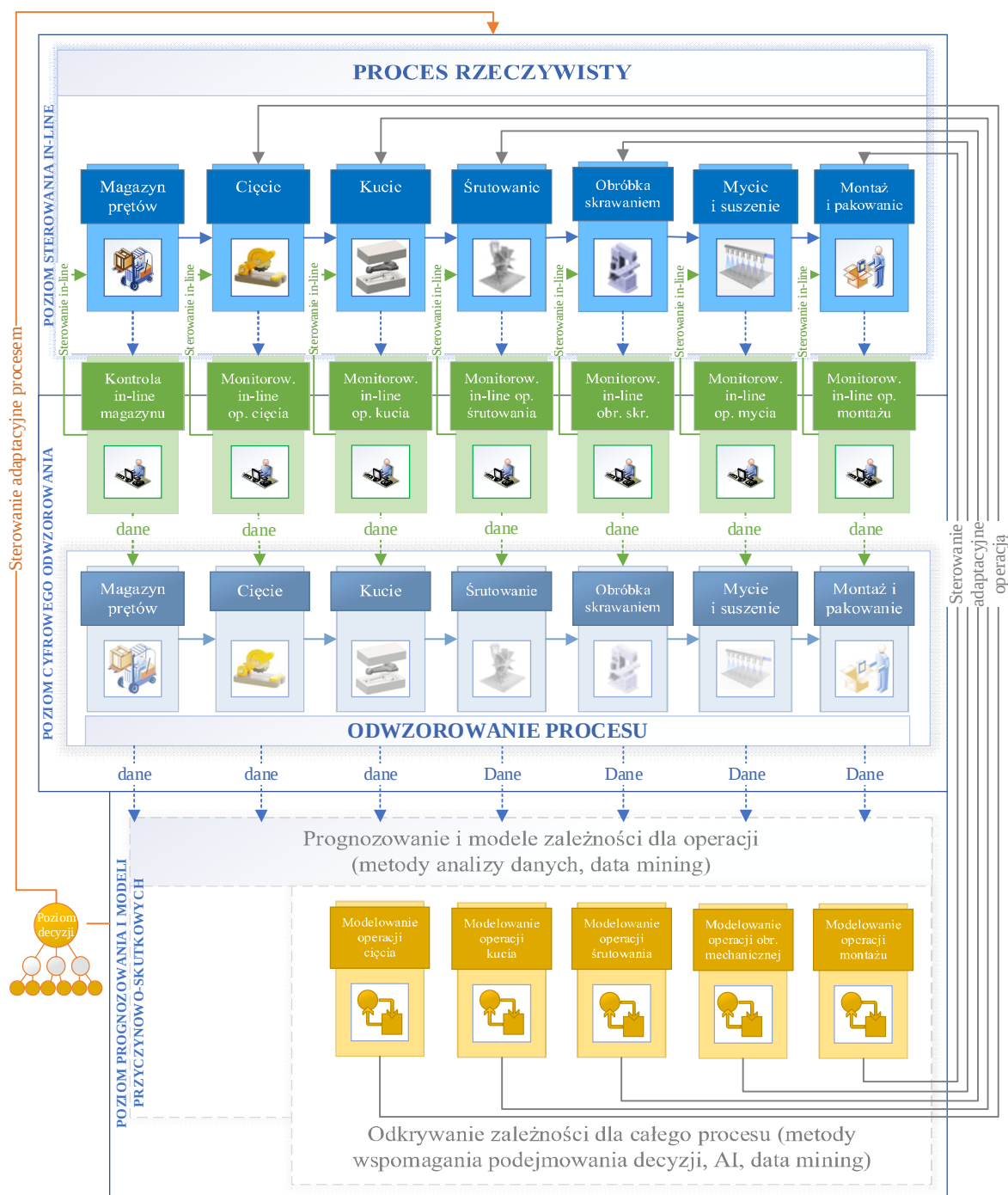
Decydenci, aby móc na bieżąco sterować procesem produkcyjnym w zakładanym akceptowalnym czasie w trakcie jego realizacji powinni dążyć do odkrywania i rozumienia reguł rządzących tym procesem oraz rozwijać zdolność przewidywania jego przyszłych stanów i szybkiego reagowania na stany niepożądane, także dzięki wykorzystaniu technik cyfrowych i metod wspomagania decyzji. Sprostanie temu zadaniu zostało zrealizowane dzięki poprawnemu sformułowaniu, na potrzeby budowy modelu decyzyjnego, sprawnie działającego sprzężenia informacyjnego pomiędzy metodami oceny stanu procesu, a pozostałymi elementami systemu, co obejmowało:

- zaimplementowanie mechanizmów ekstrakcji informacji prognostycznych oraz wspomagających podejmowanie decyzji o ewentualnych działaniach korekcyjnych i/lub korygujących,
- określenie sposobu analizy danych związanych jednocześnie ze stosowaną technologią, wyrobem, parametrami maszyn czy środowiskiem.

Jak już wspomniano wcześniej, badania zainicjowano od analizy przepływu informacji podczas realizacji procesu produkcji korpusu wodomierza. W ramach tego procesu zbadano zależności między jakością produktu, a innymi parametrami powstającymi w trakcie konkretnej operacji technologicznej, jak również powiązania pomiędzy samymi operacjami, a stanowiskami produkcyjnymi, uwzględniając przy tym sprzężenia zwrotne. Niski poziom jakości decyzji w procesie produkcji z ukazaniem obszarów podlegających docelowym usprawnieniom przedstawiono na rysunku 4.14. W drugim kroku celem było opracowanie kompleksowego zobrazowania procesu produkcji po zakończeniu badań, opartego na systemie informatycznym umożliwiającym adaptacyjne sterowanie procesem produkcji dzięki wspomaganie przez zaimplementowany model decyzyjny, co przedstawiono na rysunku 4.15.



Rys. 4.14 Niski poziom jakości decyzji w procesie produkcji korpusu wodomierza – obszary podlegające usprawnieniu



Rys. 4.15 Proces produkcji korpusu wodomierza – stan docelowy

W wyniku przeprowadzonych badań zaprojektowano model decyzyjny do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i jakości wyrobu. W ramach wykonanych prac:

- opracowano strukturę danych wejściowych i informacji wyjściowych,
- dokonano klasyfikacji i wyboru metod diagnozowania i prognozowania stanu procesu oraz metod wspomaganie decyzji dotyczących zmian w procesie produkcji. Analizie poddano metody z grupy metod addytywnej funkcji użyteczności, z grupy metod korzystających z systemu relacji (tworzących ranking),

- sformułowano wymagania dla modelu decyzyjnego obejmujące funkcje systemu umożliwiające:
  - o monitorowanie procesu - zdolność do ciągłego monitorowania procesu, zbieranie danych na temat parametrów procesu, cech krytycznych wyrobu oraz danych na temat stopnia realizacji zlecenia produkcyjnego, co pozwoli na bieżące wykrywanie i korekcję odchyłeń od planowanych założeń,
  - o analizę danych - zaimplementowanie algorytmów analizy danych do identyfikacji istotnych wzorców, anomalii i trendów w procesie produkcji, służące ocenie stabilności procesu i zdolności procesu w trybie on-line, co jest niezbędne do wyciągania wniosków na podstawie zgromadzonych informacji i umożliwia podejmowanie świadomych i opartych na faktach decyzji,
  - o adaptowanie systemu - opracowanie algorytmów adaptacyjnych, pozwalających na dostosowanie parametrów procesu w czasie rzeczywistym w odpowiedzi na zmieniające się warunki produkcyjne. W rezultacie możliwa staje się kalibracja i optymalizacja parametrów procesu w celu poprawy wydajności i jakości produktu,
  - o podejmowanie decyzji wielokryterialnych - opartych na wielu kryteriach, z wyszczególnieniem: wydajności, jakości oraz zasobów, co umożliwia uwzględnienie wielu czynników jednocześnie. Prowadzi to do bardziej zrównoważonych wyborów w złożonych sytuacjach. Dzięki tej funkcji systemu można zarządzać kompromisami między różnymi celami i ograniczeniami, co zwiększa skuteczność podejmowanych decyzji,
  - o integrację zewnętrznych czujników z systemem - pozyskanie precyzyjnych danych na temat przebiegu procesu. Umożliwia zbieranie bieżących i dokładnych danych z różnych źródeł, co zwiększa precyzję i aktualność informacji wykorzystywanych w procesie decyzyjnym,
  - o zminimalizowanie czasu reakcji na zdarzenia w procesie - reakcja na zdarzenia w czasie rzeczywistym. Pozwala na szybsze wykrywanie i korygowanie nieprawidłowości, co umożliwia utrzymanie ciągłości operacji i minimalizowanie przestojów,
  - o skalowalność systemu - łatwość rozbudowy o nowe moduły czy funkcjonalności, z dostosowaniem do różnej wielkości produkcji. Umożliwia elastyczne dostosowywanie zasobów i funkcji w miarę wzrostu obciążenia lub zmian w wymaganiach. Pozwala to na efektywne zarządzanie rosnącymi ilościami danych i zwiększającymi się potrzebami użytkowników, zapewniając jednocześnie utrzymanie wysokiej wydajności i ciągłości działania systemu,
  - o łatwość użytkowania - intuicyjny interfejs, zapewnia efektywne interakcje z systemem, co przekłada się na szybsze i bardziej precyzyjne podejmowanie decyzji przez użytkowników. Ułatwia to również szybsze wdrożenie systemu oraz minimalizuje potrzebę intensywnego szkolenia, co zwiększa ogólną efektywność i akceptację rozwiązania w przedsiębiorstwie,
  - o spójność z normami branżowymi dotyczącymi produkcji wodomierzy.

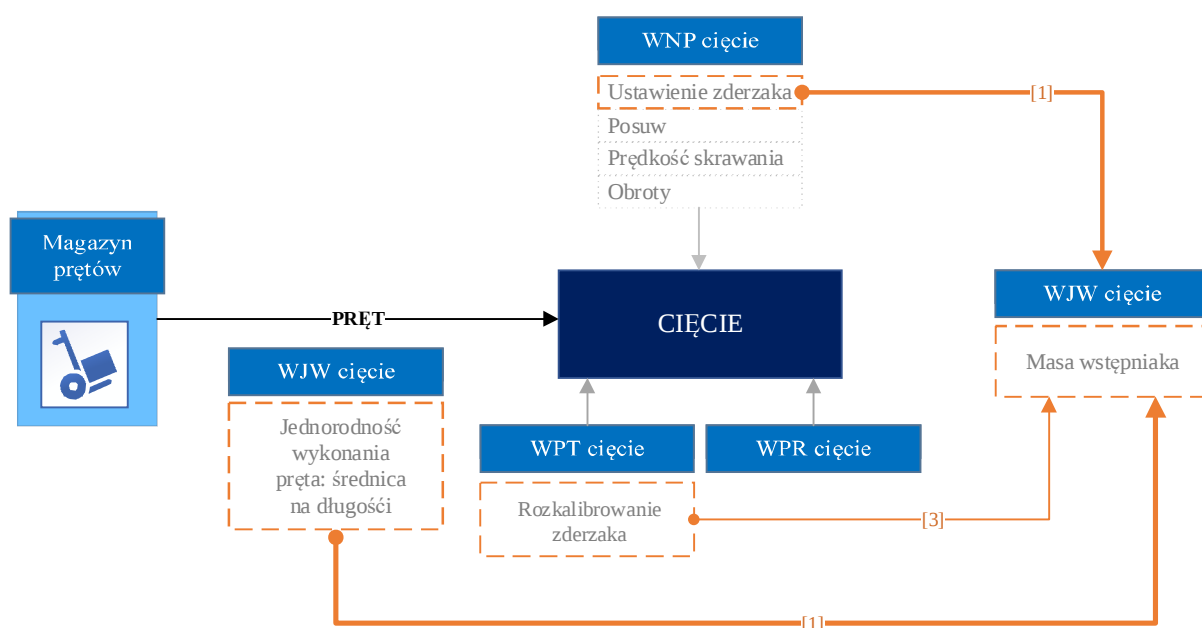
Zaprojektowanie modelu decyzyjnego dla procesu wytwarzania korpusów wodomierza, który byłby wiarygodny, wymagało ustalenia czynników istotnie wpływających na stan tego procesu oraz zidentyfikowanie charakteru i siły tego wpływu. Konstrukcję ostatecznego modelu uzyskano po przejściu 5 kolejnych kroków:

- I. Identyfikacja i zdefiniowanie zależności dla wielkości jakościowych, nastawnych, technologicznych i resztkowych w procesie produkcji korpusów wodomierza

Na jakość produktu (cechy krytyczne), którym jest korpus wodomierza wpływ ma wiele zmiennych związanych zarówno z procesem, otoczeniem, jak i materiałem w stanie dostawy. Zmienne te podzielono na 4 grupy:

1. WJW – Wielkości Jakościowe Wyrobu - są wynikiem procesu, np. odchyłka wymiaru, uszkodzenia, czas obróbki,
2. WNP – Wielkości Nastawne Procesu - są nastawiane przez operatora: np. siła nacisku suwaka prasy, prędkość obrotowa czy posuw narzędzia,
3. WPT – Wielkości Procesowe Technologiczne - są wynikiem realizacji procesu i wpływają bezpośrednio na WJW, np. zużycie matrycy, zużycie narzędzi do obróbki skrawaniem (trudno je mierzyć w czasie pracy, raczej tylko off-line),
4. WPP – Wielkości Procesowe resztkowe - są wypadkową WNP oraz WPT i wpływają pośrednio na WJW, np. siła, moc, drgania, emisja, temperatura (można jest stosunkowo łatwo mierzyć/monitorować).

Identyfikację zależności dla przedstawionych wielkości przeprowadzono dla każdej operacji technologicznej biorącej udział w procesie produkcji korpusu wodomierza. Przykład mapy zależności dla wielkości dla operacji cięcia przedstawiono na rysunku 4.16, a przykład siły wpływu tych wielkości na cechy krytyczne przedkuwki dla operacji cięcia przedstawiono w tabeli 4.7.



Rys. 4.16. Mapa zależności wielkości jakościowych, procesowych, nastawnych dla operacji cięcia

Tab. 4.7 Siła wpływu wielkości WJW, WNP, WPT oraz WPR na cechy krytyczne przedkuwki dla operacji cięcia

| Symbol operacji | WJW na wyjściu wymaganie dla części/wyrobu | Wpływ na WJW<br>Siła zależności: 1,2,3 (1 – silna zależność; 3 – słaba zależność) |                                                                              |                              |     |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----|
|                 |                                            | WJW operacji poprzedniej                                                          | WNP                                                                          | WPT                          | WPR |
| <b>OP10</b>     | Masa wstępniaka                            | Jednorodność wykonania pręta: średnica na długości – (1)                          | Ustawienie zderzaka (1)<br>Prędkość skrawania (2)<br>Posuw (2)<br>Obroty (2) | Rozkalibrowanie zderzaka (3) | --  |

Każdy z wyszczególnionych czynników materiałowych oraz procesowych wpływał na przebieg procesu cięcia i jakość wyrobu. Prostoliniowość pręta w stanie dostawy była istotna dla precyzji wymiarów. Z kolei prawidłowe ustawienie i parametry procesowe były kluczowe dla efektywności cięcia. Utrzymanie spójności wymiarów wyjściowych było także związane z kontrolą jakości dotyczącą kalibracji zderzaka przecinarki ta.

## II. Identyfikacja możliwych przebiegów procesu technologicznego i wybór przebiegu optymistycznego i pesymistycznego do dalszych badań

Produkcja korpusu wodomierza jak przedstawiono wcześniej, wykonywana jest w sześciu operacjach technologicznych, tj.: cięcie, kucie, oczyszczanie, obróbka mechaniczna z myciem i suszeniem oraz montaż. FAS dysponuje różną liczbą dedykowanych maszyn (stanowisk) do przeprowadzenia tych operacji, dlatego konkretne zlecenie produkcyjne może być realizowane w różnych strumieniach (wariantach). W badanym procesie technologicznym cięcie może być realizowane na jednym z 3 stanowisk (3 sztuki różnych pił tarczowych), kucie na 2 stanowiskach (2 różne prasy do kucia na gorąco), śrutowanie odbywa się na 1 stanowisku, obróbka mechaniczna realizowana jest na jednej z 3 maszyn transferowych, a montaż realizowany jest na 2 stanowiskach, co zestawiono w tabeli 4.8. Stąd, liczba kombinacji realizacji zlecenia produkcyjnego wynosi 36.

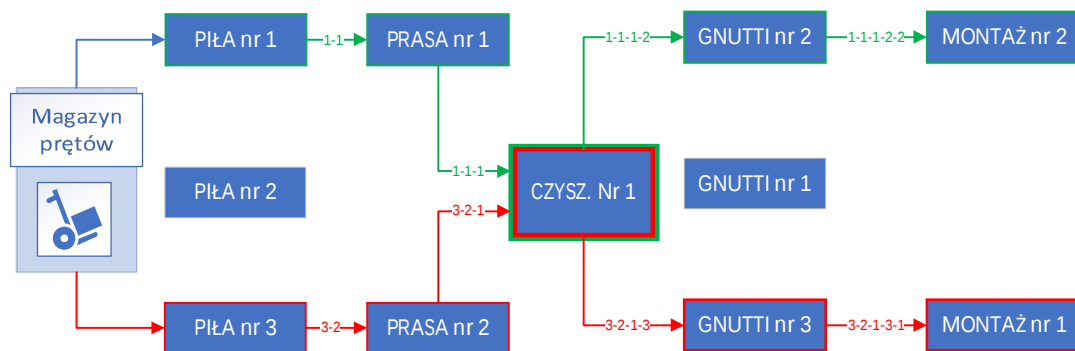
Tab. 4.8 Liczba dostępnych maszyn dla realizacji poszczególnych operacji procesu technologicznego

| Magazyn | Cięcie     | Kucie        | Czyszczenie | Obróbka mechaniczna | Montaż |
|---------|------------|--------------|-------------|---------------------|--------|
| M1      | Piła1 – P1 | Prasa1 – PR1 | SR1         | Gnutti1 - GN1       | M1     |
| -       | Piła2 – P2 | Prasa2 – PR2 | -           | Gnutti2 - GN2       | M2     |
| -       | Piła3 – P3 | -            | -           | Gnutti3 - GN3       | -      |

Celem analizy procesu i identyfikacji zależności pomiędzy wytypowanymi w kroku 1 zmiennymi, wybrano dwa przebiegi – tzw. przebieg optymistyczny i przebieg pesymistyczny. Przebieg optymistyczny zakłada realizację zlecenia produkcyjnego na stanowiskach (maszynach) o najwyższych zdolnościach jakościowych, zaś pesymistyczny o najniższych zdolnościach jakościowych. Dla wskazania tych przebiegów przeprowadzono ocenę zdolności jakościowej maszyn, obejmującą:

- selekcję materiału/części wejściowych spełniających wymagania. Dokonano oceny wzrokowej i pomiaru cech jakościowych materiału/części podawanych następnie na stanowisko produkcyjne. Na wejściu podano materiał/części spełniające w 100% wymagania,
- przeprowadzenie operacji technologicznej,
- dobór i ocenę przydatności systemu pomiarowego stosowanego w ocenie cech jakościowych,
- ocenę i pomiar części na wyjściu operacji. Dokonano ocena wzrokowej i pomiaru cech jakościowych kształtowanych w danej operacji.

Przeprowadzona ocena zdolności jakościowej maszyn umożliwiła wybór do dalszych badań przebiegu optymistycznego i pesymistycznego procesu, co przedstawiono na rysunku 4.17 dla maszyn o najwyższej zdolności jakościowej - ścieżka zielona oraz dla maszyn o najniższych zdolnościach jakościowych – ścieżka czerwona.



Rys. 4.17. Ścieżka pesymistyczna i optymistyczna przebiegu procesu  
(ze względu na spełnienie wymagań jakościowych)

### III. Akwizycja danych z realizacji zleceń produkcyjnych - przebieg optymistyczny i pesymistyczny – zdolność procesu. Analiza danych i odkrycie charakteru zależności pomiędzy wielkościami (zmiennymi)

Dzięki wykonanej analizie i ocenie zdolności maszyn, możliwe stało się dokonanie wyboru dwóch ścieżek realizacji procesu, tj.: ścieżki optymistycznej (stanowiska o najwyższej zdolności jakościowej) oraz ścieżki pesymistycznej (stanowiska o najniższej zdolności jakościowej). Dla tych dwóch ścieżek w dalszej kolejności oceniono zdolność jakościową procesów, w celu zweryfikowania zmienności wprowadzanej już nie tylko przez maszyny, ale także przez materiał, ustawienia, operatora. Badania zostały tak zaprojektowane, aby umożliwić uchwycenie zależności pomiędzy zmiennymi procesu w celu zaproponowania modelu wspomagającego podejmowanie decyzji zarządczych. Ocena zdolności jakościowej procesu przebiegała według schematu:

- wyznaczenie wielkości próby oraz częstości wyboru materiału do próby (sampling),
- przeprowadzenie operacji technologicznej,
- kontrola parametrów i otoczenia procesu,

- ocena i pomiar części na wyjściu operacji,
- ocena zdolności jakościowej procesu.

Celem oceny zdolności jakościowej procesu oraz zależności pomiędzy wielkościami jakościowymi procesu, a jego parametrami, wyznaczono wielkość próby oraz częstotliwość próbkowania – plan tzw. sampling (próbkowanie). Wyznaczenie wielkości próby odbyło się z wykorzystaniem wzoru (4.1) na tzw. minimalną liczebność próby przy założonym poziomie błędu wnioskowania:

$$n = \frac{N \cdot u_{\alpha/2}^2 \cdot p \cdot (1-p)}{N \cdot B^2 + u_{\alpha/2}^2 \cdot p \cdot (1-p)}, \quad (4.1)$$

gdzie:

$N$  – wielkość populacji

$\alpha$  - poziom istotności (tutaj  $\alpha = 0,05$  stąd  $u_{\alpha/2}^2 = 1,96$ )

$B$  – akceptowalny poziom błędu (tutaj:  $B = 5\%$ )

$p$  – przyjęty poziom frakcji (założono wersję pesymistyczną:  $p = 0,5$ ).

#### IV. Opracowanie modelu decyzyjnego

Model decyzyjny zbudowano w oparciu o metody regresyjne i heurystyczne. Do opracowania reguł adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza wykorzystano wyniki analiz technik regresyjnych (regresja liniowa, wieloraka oraz drzewa CART) i doświadczenie praktyczne. Model integruje różne rozwiązania dotyczące oceny stanu procesu i wyrobu. Elementami modelu jest zbiór reguł i zasad, które stanowią podstawę dla adaptacyjnego sterowania produkcją. Kompleksowy charakter modelu możliwy jest poprzez jednoczesne zastosowanie narzędzi i metod do oceny stanu procesu i jakości wyrobu oraz zbioru reguł decyzyjnych.

Posiadana baza wiedzy w kontekście procesu produkcji korpusu wodomierza pełni fundamentalną rolę w sformułowanym modelu decyzyjnym. Baza wiedzy to zbiór informacji, reguł i doświadczeń, które system wykorzystuje do podejmowania decyzji operacyjnych, analizy danych i adaptacyjnego sterowania. Głównymi elementami bazy wiedzy są:

- reguły decyzyjne – określają, jakie działania należy podjąć w odpowiedzi na konkretne warunki produkcyjne,
- zdarzenia - opisy zdarzeń na temat wcześniejszych incydentów, problemów technicznych i skutecznych strategii ich rozwiązania w procesie produkcji,
- zależności przyczynowo-skutkowe - określone i zapisane zależności między różnymi parametrami procesu, a jakością wyrobu,
- warunki graniczne - informacje na temat tolerancji dla różnych parametrów oraz granicznych wartości, które nie powinny zostać przekroczone,
- kryteria oceny jakości - szczegółowe opisy, jakie wymogi jakościowe muszą zostać spełnione, aby produkt został uznany za zgodny z normami i oczekiwaniami,

- historia zmian - chronologiczny zapis zmian w bazie wiedzy, czyli informacje na temat aktualizacji reguł, nowych danych referencyjnych czy strategii adaptacyjnego sterowania w wyniku przeszłych doświadczeń.

Obok oceny zależności pomiędzy poszczególnymi cechami, zdefiniowano również relacje wpływu cech materiału wejściowego oraz parametrów procesu/maszyny na cechy materiału (części) wyjściowego z operacji technologicznej. Relacje te oznaczono z wykorzystaniem skali 5-stopniowej, jako: 1 - silne, 2 – średnie, 3 – słabe, 4 – bardzo słabe, 5 – bez wpływu. Przykład relacji wpływu i zależności pomiędzy parametrami procesu, a masą przedkuwki w operacji cięcia przedstawiono w tabeli 4.9. Przykład zbudowanych reguł decyzyjnych dla wpływu ustawień zderzaka na masę przedkuwki przedstawiono w tabeli 4.10.

Tab. 4.9 Macierz wpływu pomiędzy parametrami procesu/maszyny w operacji cięcia, a cechą krytyczną wstępniaka

| Parametr procesu/maszyny | Ustawienie zderzaka                                                                        | Prędkość skrawania                                                                         | Posuw                                                                                      | Obroty                                                                                      | Średnica pręta – materiał wejściowy                                                          | Rozkalibrowanie zderzaka                                                                      |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cecha wyrobu             |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                             |                                                                                              |                                                                                               |
| Masa                     | silny<br> | słaby<br> | słaby<br> | słaby<br> | silny<br> | średni<br> |

Tab. 4.10 Zbiór reguł decyzyjnych dla operacji cięcia

| Nr | Warunek:                                                      | Warunek:                                           |
|----|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| C1 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: <513; 517>  | to kontynuuj cięcie                                |
| C2 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: <517; 519>  | to od bieżącego ustawienia zderzaka odejmij 0,15mm |
| C3 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: <520; 522>  | to od bieżącego ustawienia zderzaka odejmij 0,3mm  |
| C4 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: <523; 525>  | to zmierz średnicę prętów - partia do sortowania   |
| C5 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: <511; 513>  | to do bieżącego ustawienia zderzaka dodaj 0,15mm   |
| C6 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: <508; 510>  | to do bieżącego ustawienia zderzaka dodaj 0,3mm    |
| C7 | Jeżeli masa 5 kolejnych wstępniaków w przedziale: poniżej 508 | to zmierz średnicę prętów - partia do sortowania   |

## V. Skuteczność modelu decyzyjnego

Skuteczność modelu decyzyjnego rozumiana była jako skuteczność podejmowanych decyzji zarządczych w procesie produkcyjnym w kontekście sterowania jakością tego procesu. Przyjęto, że model decyzyjny będzie skuteczny, jeżeli pozwoli wskazać wariant decyzji i podać jaka jest szansa osiągnięcia celu przy danym wariantcie rozwiązania. Dla danych testowych model powinien wskazać rozwiązanie, a oszacowane prawdopodobieństwo osiągnięcia celu powinno zawierać się w przedziale 0,80-0,95.

W celu oceny skuteczności modelu decyzyjnego przeprowadzono symulacje numeryczne na podstawie danych uzyskanych z procesu produkcji korpusu wodomierza, w których dla każdej operacji wprowadzono wzorce zdarzeń, których pojawienie się powoduje utratę stabilności przez proces i w konsekwencji ryzyko wytworzenia części/wyrobu niezgodnego. Każdą symulację powtórzono kilkakrotnie. W ocenie skuteczności udział wzięli operatorzy pracujący na stanowisku/maszynie oraz inżynierowie procesu w roli ekspertów. Rolą operatora była ocena poprawności uzyskiwanych komunikatów przez model w odniesieniu do uzyskanych wyników procesu oraz podjęcie decyzji na podstawie informacji z modelu. Zadaniem inżyniera procesu z kolei była podobnie ocena poprawności wyników modelu, ale również ocena decyzji podjętej przez operatora – ekspert podawał poprawną decyzję, stanowił odniesienie do oceny decyzji operatorów, tj. wskazywał decyzje poprawne, które prowadziły do osiągnięcia celu w postaci prawidłowej decyzji operacyjnej. Skuteczność modelu mierzona była liczbą podjętych poprawnie decyzji przez operatora w porównaniu do decyzji podjętych przez eksperta.

Dla przykładu w operacji technologicznej cięcia wprowadzono następujące wzorce zdarzeń, które w każdej symulacji pojawiały się losowo:

1. masa 5 kolejnych przedkuwek w przedziale: <517; 519>
2. masa 5 kolejnych przedkuwek w przedziale: <520; 522>
3. masa 5 kolejnych przedkuwek w przedziale: <523; 525>
4. masa 5 kolejnych przedkuwek w przedziale: <511; 513>
5. masa 5 kolejnych przedkuwek w przedziale: <508; 510>
6. masa 5 kolejnych przedkuwek w przedziale: poniżej 508.

Model decyzyjny, obok sygnału wzorca, generował informację o ryzyku nieosiągnięcia celu, czyli wyprodukowania części spełniających wymagania. Było ono szacowane na podstawie analizowanego rozkładu prawdopodobieństwa wartości cechy w odniesieniu do granic tolerancji. W wyniku symulacji numerycznej uzyskano następujące dane dla operacji technologicznej cięcia zestawione w tabeli 4.11.

Tab. 4.11 Wyniki oceny skuteczności modelu decyzyjnego dla operacji technologicznej cięcia

| Wzorzec                    | Liczba wskazań przez model |    |    |    |    |    | Liczba podjętych poprawnie decyzji |      |      |      |      |      |
|----------------------------|----------------------------|----|----|----|----|----|------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                            | S1                         | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S1                                 | S2   | S3   | S4   | S5   | S6   |
| 1                          | 5                          | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5                                  | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |
| 2                          | 5                          | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 4                                  | 5    | 5    | 5    | 3    | 3    |
| 3                          | 5                          | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5                                  | 5    | 4    | 4    | 4    | 5    |
| 4                          | 5                          | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 4                                  | 5    | 3    | 5    | 5    | 3    |
| 5                          | 5                          | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5                                  | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |
| 6                          | 5                          | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5                                  | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |
| Suma                       | 30                         | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 28                                 | 30   | 27   | 29   | 27   | 26   |
| Szansa na osiągnięcie celu |                            |    |    |    |    |    | 0,93                               | 1,00 | 0,90 | 0,97 | 0,90 | 0,87 |

Symulację przeprowadzono każdorazowo dla 480 danych pomiarowych, w które włączono 30 wzorców. Powtórzono ją 6-krotnie. Skuteczność modelu w wyniku symulacji numerycznej na bezpośrednich danych produkcyjnych wyniosła 100%. Liczba wskazań zdarzeń przez model była poprawna. Model zareagował w każdej sytuacji zasymulowanej

w weryfikacji. Prawdopodobieństwo osiągnięcia celu w wyniku zastosowania modelu średnio wyniosło 0,93 i nie było niższe od 0,87.

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie modelu decyzyjnego na potrzebę budowy systemu adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza w cyfrowym odwzorowaniu tego procesu. Skuteczność modelu została oceniona poprzez wykazanie, że model wskaże decyzję i szansę osiągnięcia celu przy danym wariancie rozwiązania. Fundamentem było opracowanie bazy wiedzy i modelu analizowania tej wiedzy z zastosowaniem, między innymi, metod wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji i metod heurystycznych, pozwalających wskazać najlepszą decyzję operacyjną dla zadanych uwarunkowań systemu produkcyjnego i pod względem przyjętych kryteriów. W ramach tych działań opracowano strukturę danych wejściowych i informacji wyjściowych oraz dokonano klasyfikacji i wyboru metod diagnozowania i prognozowania stanu procesu oraz metod wspomaganie decyzji dotyczących zmian w procesie produkcji. Skuteczność sformułowanego modelu decyzyjnego zdefiniowano jako możliwość wskazania decyzji oraz określenie szansy osiągnięcia celu. W tym przypadku założono, że celem jest wyprodukowanie części zgodnej z postawionymi wymaganiami. Model pozwolił na wyznaczenie prawdopodobieństwa wytworzenia części zgodnej oraz na podjęcie decyzji działań korygujących. Nie zawsze podejmowane decyzje przez operatorów były zgodne z decyzją inżyniera procesu. Stąd prawdopodobieństwo osiągnięcia celu średnio osiągnięto na poziomie: 0,94 i nie było niższe od 0,83.

Pakiet zaprojektowanych metod został, w celu implementacji komputerowej, zapisany w języku zgodnym z wybranym standardem opisu inżynierii oprogramowania, tj. powstały algorytmy metod. Każdy algorytm poddany został badaniu weryfikacyjnemu na danych testowych, celem potwierdzenia braku błędów logicznych w zapisach. Opracowano także scenariusze zawierające instrukcje dla użytkownika stosującego w systemie metody i narzędzia wybrane dla procesu produkcji korpusu wodomierza (scenariusze przypadków). W tym celu do kolejnych operacji procesu technologicznego produkcji korpusu wodomierza przypisano, z uwzględnieniem różnych technik wytwarzania oraz możliwości automatyzacji i cyfryzacji poszczególnych wielkości i sposobu zbierania danych, narzędzia do monitorowania oraz wspomaganie decyzji operacyjnych: stanowiskowych i międzystanowiskowych, co zawarto w tabeli 4.12.

Tab. 4.12 Wykaz narzędzi do monitorowania poszczególnych operacji technologicznych

|                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>OP: CIĘCIE</b>                                                                    |
| [1] Statystyki opisowe dla cech wyrobu i parametrów procesu                          |
| [2] Wykres szeregu czasowego dla cech mierzonych na stanowisku                       |
| [3] Wskaźniki zdolności jakościowej dla wybranych cech                               |
| [4] Zbiór reguł decyzyjnych typu: <i>jeśli...to...</i>                               |
| [5] Analiza zależności (metody regresyjne)                                           |
| <b>OP: KUCIE</b>                                                                     |
| [1] Statystyki opisowe dla cech wyrobu i parametrów procesu                          |
| [2] Wykres szeregu czasowego dla cech mierzonych przez operatora                     |
| [3] Wskaźniki zdolności jakościowej dla wybranych cech                               |
| [4] Karty kontrolne wartości średniej i rozstępu dla cech mierzonych przez operatora |

|                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [5] Zbiór reguł decyzyjnych typu: <i>jeśli...to...</i>                                            |
| [6] Analiza zależności (metody regresyjne)                                                        |
| <b>OP: ŚRUTOWANIE</b>                                                                             |
| [1] Statystyki opisowe dla cech wyrobu i parametrów procesu / dla czasu śrutowania                |
| <b>OP: OBRÓBKA MECHANICZNA</b>                                                                    |
| [1] Statystyki opisowe dla cech wyrobu mierzonych przy maszynie oraz parametrów procesu           |
| [2] Wykres szeregu czasowego dla cech mierzonych przez operatora                                  |
| [3] Wskaźniki zdolności jakościowej dla wybranych cech                                            |
| [4] Karty kontrolne wartości pojedynczej i rozstępu ruchomego dla cech mierzonych przez operatora |
| [5] Analiza zależności (metody regresyjne)                                                        |
| <b>OPERACJA: MONTAŻ</b>                                                                           |
| [1] Statystyki opisowe dla cech wyrobu mierzonych przy maszynie oraz parametrów maszyn            |
| [2] Wykres szeregu czasowego dla cech mierzonych przez operatora                                  |
| [3] Wskaźniki zdolności jakościowej dla wybranych cech                                            |
| [5] Analiza zależności (metody regresyjne)                                                        |
| [6] Zbiór reguł decyzyjnych typu: <i>jeśli...to...</i>                                            |

## **5. WDROŻENIE: ZINTEGROWANY SYSTEM DO ADAPTACYJNEGO STEROWANIA PROCESEM PRODUKCJI KORPUSÓW WODOMIERZA**

### **5.1. Rozbudowa infrastruktury linii produkcji korpusu wodomierza o elementy umożliwiające jej cyfryzację**

Cyfryzacja produkcji to proces, w ramach którego przedsiębiorstwa wykorzystują zaawansowane technologie cyfrowe do usprawnienia i doskonalenia swoich procesów produkcyjnych. Ten dynamiczny trend przekształca tradycyjne metody produkcji, wprowadzając innowacyjne rozwiązania oparte na nowoczesnych technologiach informatycznych. Ze względu na stały i dynamiczny rozwój technologii informatycznych, obejmujący zarówno software jak i hardware, realizacja procesu cyfryzacji produkcji jest procesem złożonym i wielowątkowym. Cyfryzacja produkcji powinna objąć swoim zakresem opisanie rzeczywistości wytwórczej w przedsiębiorstwie produkcyjnym uwzględniające (Koumas i in., 2021) (Buer i in., 2021):

- automatyzację procesów produkcyjnych - wykorzystanie zaawansowanych systemów automatyki i robotyki w celu zautomatyzowania różnych etapów produkcji. Może to obejmować roboty przemysłowe, systemy transportowe czy urządzenia do automatycznego montażu.
- monitorowanie i sensorykę - wdrożenie rozwiązań monitorujących i sensorycznych, takich jak czujniki i kamery, które zbierają dane na temat stanu maszyn, jakości produktów, zużycia surowców itp. Te dane są następnie wykorzystywane do analizy i doskonalenia procesów.
- Internet Rzeczy - implementację technologii IoT, która umożliwia komunikację i wymianę danych między różnymi urządzeniami w przedsiębiorstwie. To pozwala na lepsze zarządzanie produkcją, przewidywanie usterek i zoptymalizowane zużycie energii.
- Big Data i analitykę - wykorzystanie dużych zbiorów danych i zaawansowanych narzędzi analitycznych do analizy trendów, prognozowania popytu, doskonalenia procesów produkcyjnych oraz podejmowania decyzji na podstawie danych.
- cyfrowe przetwarzanie sygnałów - zastosowanie cyfrowego przetwarzania sygnałów pozyskanych z różnych maszyn i urządzeń w celu ich analizy. Umożliwia to szybkie wykrywanie awarii, monitorowanie jakości produktów oraz poprawę wydajności.
- platformy integracyjne - wykorzystanie platform integracyjnych, które umożliwiają płynną wymianę danych między różnymi systemami, od ERP po systemy kontroli produkcji.
- systemy cyfrowego zarządzania produkcją MES - wdrożenie systemów MES, które wspierają zarządzanie produkcją w czasie rzeczywistym, zbierają dane produkcyjne i dostarczają informacje potrzebne do podejmowania decyzji.
- modelowanie procesów i wirtualne szkolenia - utworzenie wirtualnych modeli procesów produkcyjnych, co ułatwia planowanie, testowanie i doskonalenie bez

konieczności zakłócania rzeczywistego środowiska produkcyjnego. Wirtualne szkolenia mogą być również stosowane do szkolenia pracowników.

Każde przedsiębiorstwo powinno starannie określić swoje potrzeby, a także wyznaczyć cele, które chce osiągnąć wybierając poszczególne elementy wpisujące się w obraną strategię cyfryzacji produkcji. Natomiast, aby skutecznie wdrożyć nowoczesne rozwiązania informatyczne, należy równocześnie przeanalizować kilka obszarów przedsiębiorstwa, biorąc pod uwagę następujące aspekty:

- infrastrukturę sieciową przedsiębiorstwa - zbiór urządzeń oraz oprogramowania, które wchodzi w skład sieci informatycznej danego podmiotu. Składa się więc z urządzeń sieciowych takich jak serwery bądź switchy, okablowanie oraz odbiorniki końcowe, umożliwiające proces wymiany informacji w środowisku informatycznym przedsiębiorstwa. Są to elementy tworzące szkielet wzajemnych połączeń między systemami wewnętrznymi i sieciami. Projektowanie infrastruktury sieciowej jest jednym z istotniejszych elementów obejmujących proces tworzenia infrastruktury informatycznej w każdym przedsiębiorstwie, niezależnie od jego wielkości,
- infrastrukturę serwerową przedsiębiorstwa - zespół fizycznych i/lub wirtualnych komponentów, które umożliwiają przechowywanie, przetwarzanie, udostępnianie i zarządzanie danymi oraz aplikacjami w ramach organizacji. Ta infrastruktura obejmuje szereg elementów, zarówno sprzętowych, jak i programowych, które wspólnie tworzą fundament dla różnych procesów biznesowych i działań IT w przedsiębiorstwie.
- cyberbezpieczeństwo - ochrona danych, zabezpieczenie sieci i systemów, zarządzanie tożsamościami i dostępem, monitoring i analiza zdarzeń, szkolenie personelu, zarządzanie ryzykiem,
- stosowane w nim procesy technologiczne i powiązane z nim parametry procesowe. W badanym przedsiębiorstwie w procesie produkcji korpusu wodomierza jak wspomniano wcześniej stosowane są różnorodne techniki wytwarzania.

W FAS projekt cyfryzacji związany z procesem produkcji korpusu wodomierza objął szereg analiz i działań związanych z:

- projektem systemu informatycznego wspomagającego procesy decyzyjne - system adaptacyjnego sterowania produkcją, który efektywnie wspiera proces podejmowania decyzji w obszarze sterowania produkcją. System opiera się na zaawansowanych metodach wspomagania decyzji, umożliwiając jednocześnie gromadzenie danych z procesów produkcyjnych i związanych z przepływem produkcji za pomocą specjalnie opracowanych interfejsów. Zebrane dane poddawane są analizie przy użyciu metod wspomagania decyzji, w tym sztucznej inteligencji. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie informacji o bieżącym statusie procesu oraz potencjalnych zagrożeniach dla planowej realizacji zleceń produkcyjnych.
- projektem systemu MES umożliwiającym pobieranie, przetwarzanie i agregowanie sygnałów z maszyn powiązanych z parametrami procesu i cechami wyrobu, którego

celem było oprogramowanie prototypów algorytmów decyzyjnych metod wspomagania decyzji dla różnorodnych technik wytwarzania stosowanych w procesie produkcji korpusów wodomierza.

- integracją systemu MES z maszynami i urządzeniami wykorzystywanymi w procesie produkcji korpusu wodomierza, gdzie wykorzystano standard OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture). OPC UA to otwarty standard komunikacyjny używany w automatyce przemysłowej do efektywnej wymiany danych między różnymi urządzeniami i systemami. OPC UA ułatwia integrację między sprzętem, takim jak sensory i sterowniki PLC, a systemami nadzoru i zarządzania produkcją. Dzięki temu standardowi można szybko i łatwo integrować różne komponenty systemu, co z kolei przekłada się na sprawną kontrolę procesów przemysłowych.
- integracją systemu do adaptacyjnego sterowania produkcją z systemem MES, który składa się z modułów funkcjonalnych, którymi dysponuje FAS oraz oprogramowanego modelu decyzyjnego dedykowanego do produkcji korpusu wodomierza.
- wizualizacją sygnałów i wskaźników na tablicach danych (Dashboard) przez system adaptacyjnego sterowania produkcją. Każda tablica informacyjna do prezentacji danych na produkcji posiada swoją tabelę z listą parametrów (wskaźników, tagów) do wyświetlania oraz rekordy w tabeli konfiguracyjnej umożliwiające zdefiniowanie parametrów prezentacji danych: harmonogram, lokalizację, formę prezentacji (wykres, liczba, ...). Tablice umożliwiają szybki i łatwy dostęp do kluczowych informacji dotyczących procesów produkcyjnych. Służą one przede wszystkim do monitorowania, analizy i prezentacji danych związanych z produkcją w formie graficznej i przystępnej dla użytkowników.

W projekcie cyfryzacji FAS wykorzystano 2 metody:

- TOGAF (The Open Group Architecture Framework), czyli otwartą i kompleksową metodykę zarządzania architekturą przedsiębiorstwa, obejmującą również architekturę danych. Zapewnia strukturę, która pomaga zorganizować proces projektowania centrum przetwarzania danych. TOGAF skupia się na architekturze korporacyjnej, co umożliwia zintegrowane podejście do projektowania (Desfray, Philippe and Raymond, 2014) (Adams i in., 2022).
- Agile Data Warehouse Design, czyli podejście zwinne do projektowania hurtowni danych, które integruje metodykę Agile z projektowaniem hurtowni danych z wykorzystaniem: edge computing, hybryde cloud environment oraz wsparciem technologii server cluster i storage systems. Agile Data Warehouse Design pozwala na elastyczność i dostosowywanie projektu do zmieniających się potrzeb organizacji. Skupia się na iteracyjnym rozwoju, co umożliwia dostarczanie wartości w krótkich cyklach (Corr & Stagnitto, 2011) (Di Tria i in., 2017).

Użycie metody TOGAF w projekcie cyfryzacji procesu produkcji korpusu wodomierza było podyktowane następującymi możliwościami jej wykorzystania:

1. TOGAF obejmuje pełen zakres architektury przedsiębiorstwa, co oznacza, że uwzględnia zarówno aspekty biznesowe, jak i techniczne. W kontekście cyfryzacji procesu produkcji FAS, TOGAF pozwala uwzględnić wszystkie istotne elementy, od strategii biznesowej po infrastrukturę techniczną.
2. TOGAF jest elastyczny i można go dostosować do konkretnych potrzeb i kontekstu projektu. To umożliwia skalowanie metodyki do różnych rozmiarów projektów i różnych branż. Dla projektu FAS skalowalność była kluczowa, ze względu na zróżnicowaną strukturę produkcji.
3. TOGAF doskonale integruje się z strategią transformacji cyfrowej, której celem były założenia projektowe FAS. Metoda umożliwiła przedsiębiorstwu FAS definiowanie, planowanie i wdrażanie strategii cyfrowej. Takie podejście miało kluczowe znaczenie w kontekście ewolucji procesów produkcji w kierunku Przemysłu 5.0.

Wykorzystanie z kolei metody Agile Data Warehouse Design w projekcie cyfryzacji procesu produkcji korpusu wodomierza przyniosło szereg korzyści związanych z elastycznością, szybkością dostosowywania się do zmian oraz skupieniem na potrzebach biznesowych, gdyż przy definicji założeń początkowych projektu nie były znane wszystkie jego aspekty. Wynikało to z jego złożoności i konieczności dostosowania do zmieniających się założeń i potrzeb. Uwarunkowania metody:

1. Agile promuje iteracyjny proces rozwoju, gdzie kolejne funkcje i elementy są dodawane stopniowo. To pozwala na szybkie dostarczanie wartości biznesowej w miarę postępu projektu, a w przypadku FAS możliwość stopniowego wprowadzania cyfrowych rozwiązań do poszczególnych etapów produkcji była kluczowa.
2. W metodologii Agile istnieje silne zaangażowanie interesariuszy, takich jak przedstawiciele działu produkcji czy użytkownicy końcowi. Dzięki temu projekt mógł być dostosowywany do realnych potrzeb i oczekiwań FAS, co zwiększało szanse na końcowy sukces projektu.

Metodyka została dopasowana do profilu organizacyjnego i produkcyjnego FAS. Uwzględnia wiele czynników, takich jak wymagania projektu, struktura organizacji, dostępność zasobów oraz specyficzne wymagania biznesowe FAS, a także integrację istniejących systemów: ERP, automatycznych regałów windowych typu Lean-Lift oraz szaf narzędziowych. W projekcie uwzględniono także wiele aspektów technicznych: środowisko pracy serwerów, urządzeń przechowywania danych, infrastruktury sieciowej oraz dystrybucji cyfrowych danych, a także system przetwarzania sygnałów z maszyn w standardzie OPC UA (system MES).

W ramach realizowanego zadania cyfryzacji procesu produkcji korpusu wodomierza wykonane zostały prace związane z integracją elementów systemu informatycznego FAS z rozwiązaniami adaptacyjnego sterowania produkcją na poziomie sprzętowo-sieciowym. Integracja obejmowała moduły funkcjonalne dostępne w FAS oraz dedykowany model decyzyjny, dostosowany do produkcji korpusu wodomierza w FAS. Poszczególne kroki polegały na opracowaniu i zamodelowaniu architektury rozwiązania IT oraz przeprowadzenie walidacji związanej z integracją infrastruktury sieciowej i programowej stanowisk

produkcyjnych w zakresie zbierania, agregowania i przetwarzania danych cyfrowych (integracja: sprzętowa, programowa i bazodanowa).

Szczegółowy zakres prac obejmował włączenie procesów i działań pomocniczych, tj. opracowanie, przygotowanie i integrację modelu software'owego w rzeczywisty obiekt jakim jest proces produkcji korpusu wodomierza. W ramach kolejnych wykonanych prac przeprowadzono włączenie sprzętowo-sieciowe procesu w nowy system (infrastruktura sieciowa i automatyka przemysłowa), gdzie:

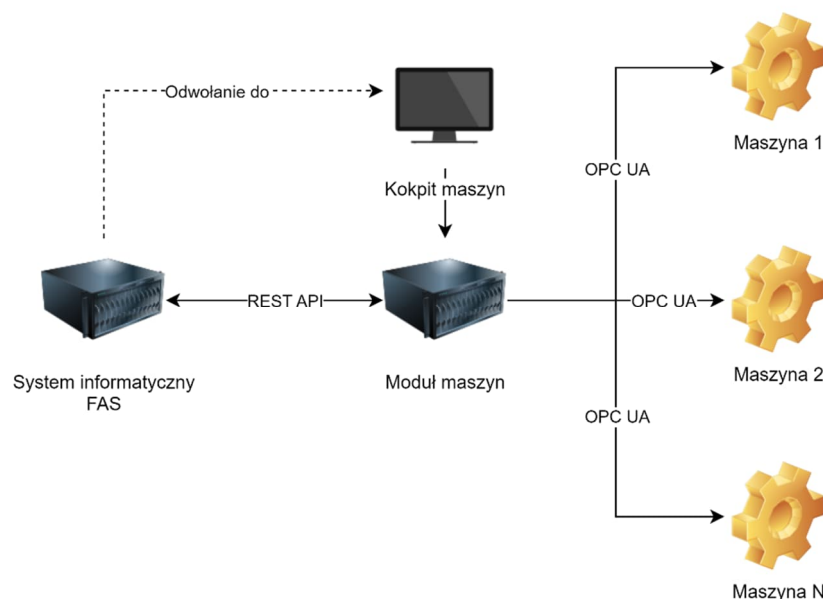
1. Opracowano moduł wymiany danych nowego modelu software'owego z istniejącym w zasobach FAS systemem ERP Veritum. Veritum to aplikacja desktopowa zainstalowana na sieciowym dysku firmowym przedsiębiorstwa FAS, która jest aktywnie wykorzystywana przez pracowników FAS. Na rysunku 5.1 przedstawiono schematyczny przegląd procesu wymiany danych między zaprojektowanym systemem informatycznym, a aplikacją Veritum, ilustrujący ich zintegrowane środowisko pracy i efektywną komunikację.



Rys. 5.1. Proces wymiany danych między systemem informatycznym FAS, a aplikacją ERP Veritum

Wymiana danych między systemami informatycznymi FAS i Veritum odbywa się za pośrednictwem zaawansowanych usług sieciowych REST, zapewniając efektywny i bezpieczny transfer informacji. Dane przesyłane w obu kierunkach są zapisywane w uniwersalnym formacie JSON, co umożliwia ich łatwą integrację i elastyczność w przetwarzaniu. Ta dwukierunkowa komunikacja pozwala na optymalizację procesów biznesowych, zapewniając szybki dostęp do aktualnych informacji oraz ich bezproblemową wymianę między obiema platformami.

2. Opracowano moduł administrowania zasobami automatycznych regałów windowych typu Lean-Lift firmy ISL poprzez zarządzanie stanami magazynowymi,
3. Opracowano moduł administrowania zasobami szafy narzędziowej Sandvik, poprzez zarządzanie stanami magazynowymi,
4. Opracowano pobieranie i przetwarzanie sygnałów z kontrolerów maszyn produkcyjnych. Jedną z funkcji zaprojektowanego systemu informatycznego FAS jest zarządzanie maszynami znajdującymi się w halach produkcyjnych. Obejmuje to zarówno ich dodawanie lub przydział do zadań produkcyjnych, a także wyświetlanie statystyk i innych parametrów zgłaszanych przez maszyny lub odczytywanych z nich. Służy do tego osobny moduł integracji z maszynami, który komunikuje się z główną częścią systemu informatycznego FAS. Architektura rozwiązania została przedstawiona na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Architektura rozwiązania - pobieranie i przetwarzanie sygnałów z kontrolerów maszyn produkcyjnych

System informatyczny FAS przechowuje informacje o maszynach w formie katalogu, wraz z informacjami opisowymi przydatnymi podczas zarządzania. Moduł maszyn przez udostępnione API zgodnego z protokołem REST pobiera informacje o maszynach i aktualnych zadaniach oraz zleceniach produkcyjnych. Następnie, za pomocą protokołu OPC UA, łączy się z maszynami znajdującymi się pod kontrolą przedsiębiorstwa FAS i odczytuje z nich dane. W zależności od rodzaju maszyny są to różne parametry, pozyskiwane z różną częstotliwością. Zbierane wartości z urządzeń są uzupełniane przez statystyki dotyczące samych zadań produkcyjnych. Zebrane dane są przetwarzane przez moduł maszyn i stanowią podstawę do wyliczania różnorodnych złożonych statystyk. Pobrane wartości są wiązane z zadaniami produkcyjnymi, o ile jest to możliwe. Obliczone statystyki moduł maszyn udostępnia w postaci webowej aplikacji klienckiej, zwanej kokpitem maszyn. Jest to interfejs umożliwiający podgląd danych zebranych przez moduł, a także prezentujący informacje w postaci zarówno tabelarycznej, jak i graficznej. Posiada również możliwość zarządzania pewnymi danymi istotnymi z punktu widzenia odczytu wartości z maszyn. Dostęp do tego kokpitu jest możliwy dla pracowników firmy FAS po zalogowaniu na osobne konto. System informatyczny FAS udostępnia przekierowanie do kokpitu maszyn poprzez specjalny link.

5. Opracowano kompleksowy projekt cyfryzacji procesu produkcyjnego korpusu wodomierza w FAS obejmujący:
  - opracowanie modelu systemu przetwarzania danych produkcyjnych z maszyn, i urządzeń dla procesu produkcyjnego korpusu wodomierza tj.: pobieranie, przetwarzanie, agregowanie i przechowywanie sygnałów z maszyn i urządzeń,
  - dobór i adaptację wyposażenia do przetwarzania sygnałów ze wskazanych przez FAS maszyn i urządzeń dla procesu produkcyjnego korpusu wodomierza,
  - przygotowanie modelu i struktury bazy danych do gromadzenia i przetwarzania sygnałów,

- opracowanie modeli wskaźników wspomagających proces adaptacyjnego sterowania produkcją.
6. Zaprojektowano centrum przetwarzania danych do adaptacyjnego sterowania procesem produkcyjnym korpusu wodomierza obejmujące:
- opracowanie i zamodelowanie systemu informatycznego (struktura sieci komputerowej wraz z wyposażeniem w infrastrukturę do przesyłania danych, Edge-computing: server cluster, storage systems, Hybryde cloud enviroment, Sieć WiFi, oprogramowanie systemowe, bazy danych, monitoring i kontrolę dostępu,
  - opracowanie i zamodelowanie systemu do zarządzania danymi produkcyjnymi,
  - opracowanie i zamodelowanie informatycznego systemu tablic informacyjnych dla każdego poziomu decyzyjnego. Schemat docelowej struktury systemu komputerowego FAS z uwzględnieniem komputerowych tablic informacyjnych przedstawiono w załączniku Z.21.

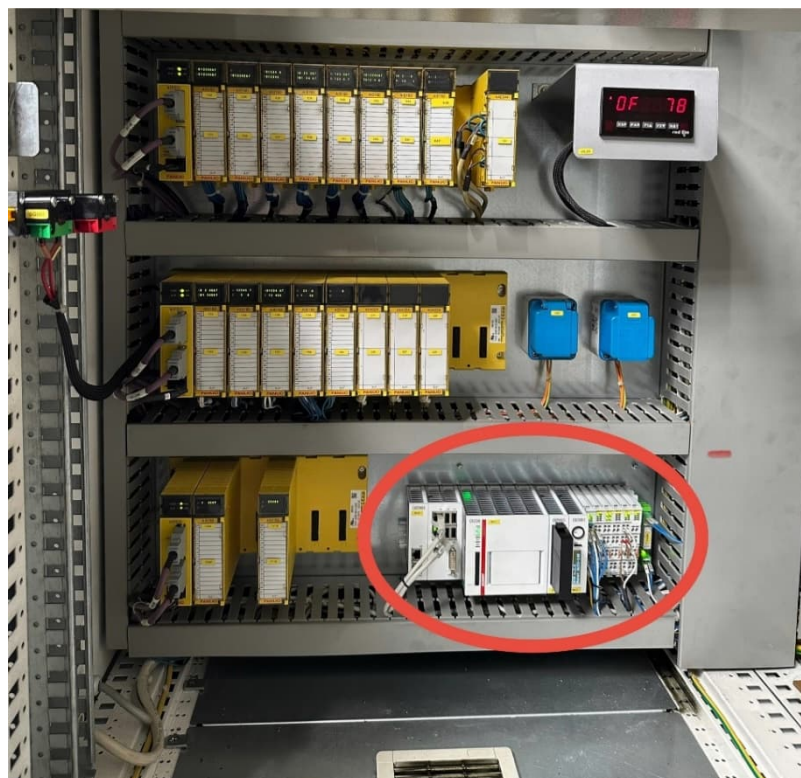
Ostatnim krokiem w opisywanej budowie systemu informatycznego FAS było wykonanie konfiguracji systemów w FAS oraz wypracowanie rozwiązań dotyczących administrowania nimi, konfiguracji nowego sprzętu oraz migracji systemów informatycznych do adaptacyjnego sterowania procesem produkcyjnym korpusu wodomierza, polegające na:

7. konfiguracji nowego sprzętu oraz migracji systemów,
8. konfiguracji i administrowaniu systemów w FAS.

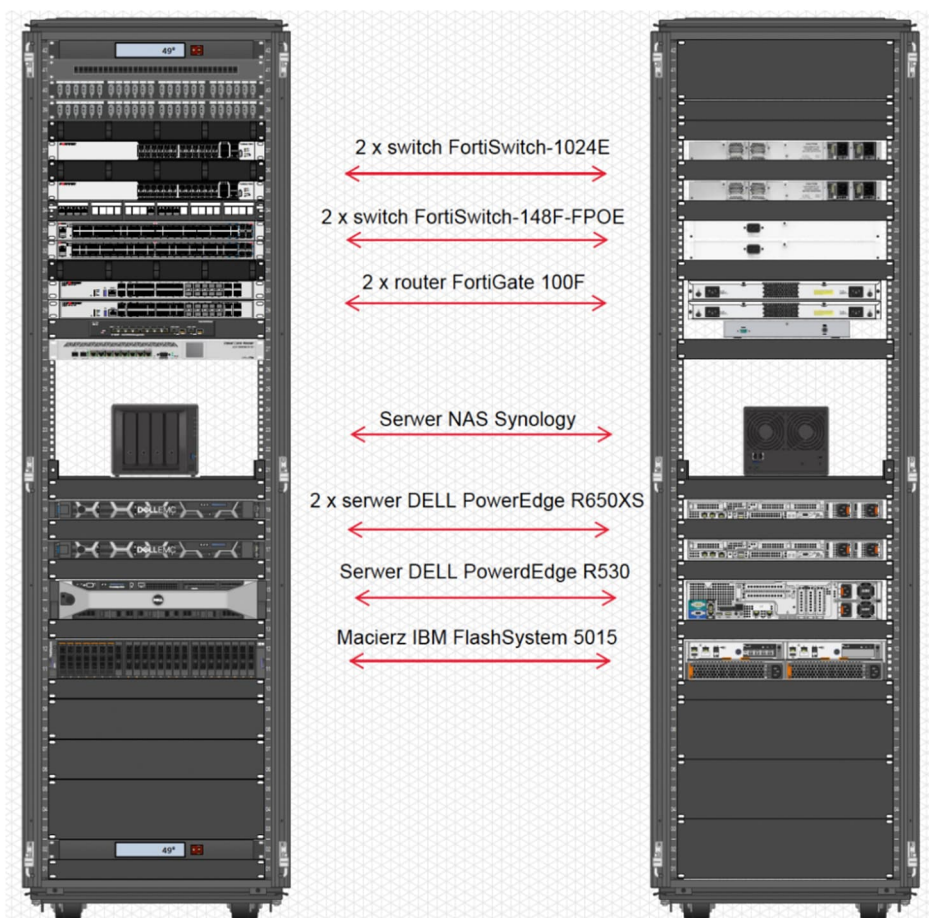
Dla tak zdefiniowanego systemu informatycznego w FAS do adaptacyjnego procesu sterowania produkcją korpusu wodomierza przygotowano strukturę sieci, której rzeczywistą mapę, wraz z umiejscowieniem maszyn biorących udział w zrealizowanych badaniach przedstawiono w załączniku Z.22 – Z.29. Przykłady skutecznie przeprowadzonej implementacji pokazano na rysunkach 5.3-5.7.



Rys. 5.3. Widok obrabiarki transferowej GNUTTI 233 ze wskazaniem szafy elektrycznej



Rys. 5.4. Umieszczenie centralnej modułowej jednostki przetwarzającej dane (typu Industry Control Device) w szafie elektrycznej obrabiarki transferowej GNUTTI 233



Rys. 5.5. Widok głównego punktu dystrybucyjnego (GPD) – po lewej widok z przodu, po prawej widok z tyłu

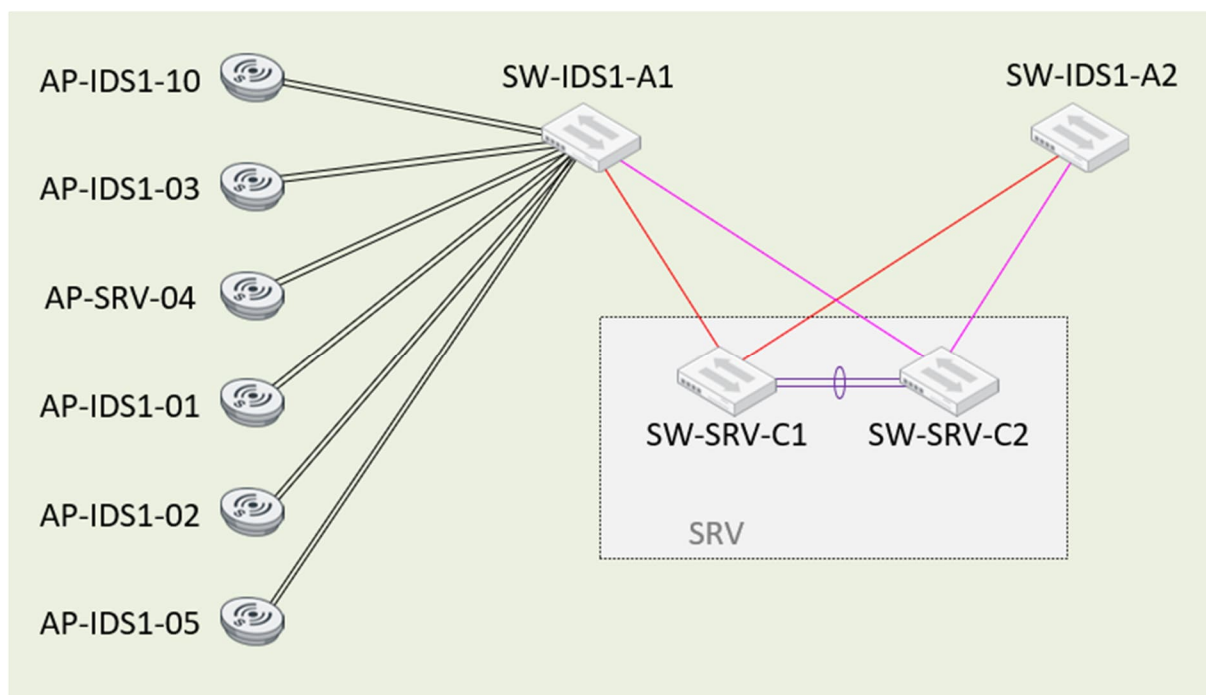


Rys. 5.6 Stanowisko z komputerem dotykowym AiO, czytnikiem kodów kreskowych i RFID



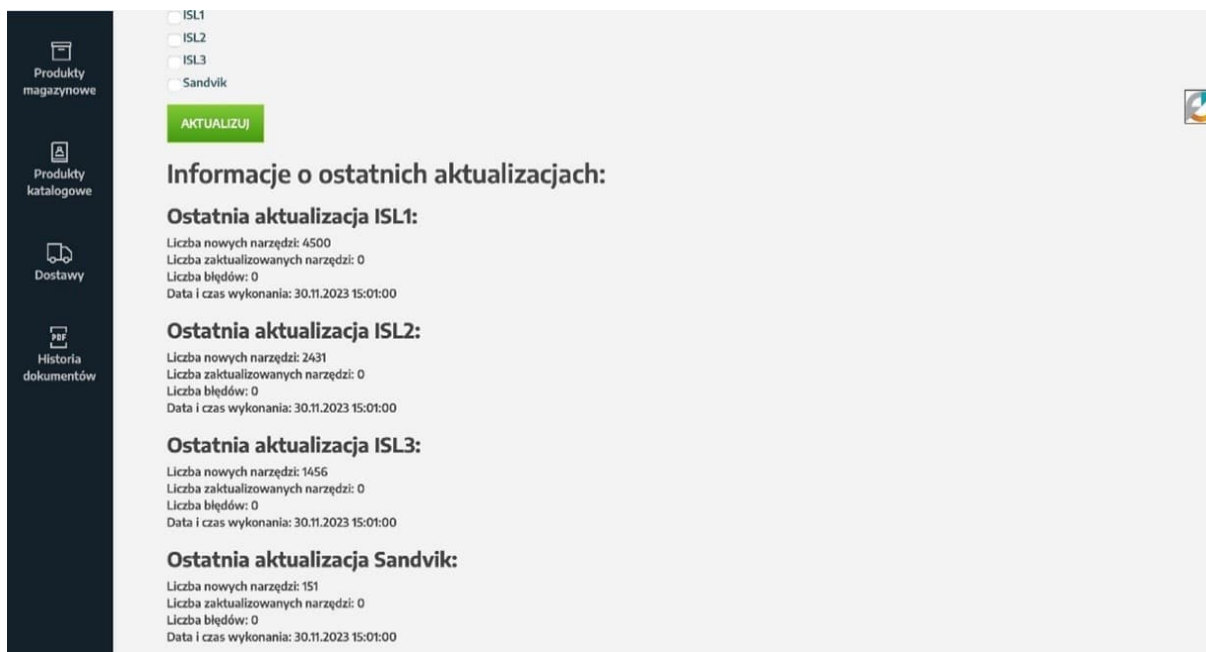
Rys. 5.7 Zainstalowany ekran TV z dashboardem prezentującym przebieg procesu produkcji

W zaprojektowanej i zbudowanej infrastrukturze badawczej wprowadzono redundancję dla krytycznych urządzeń i elementów sieci, tak aby zminimalizować ryzyko awarii, grożących utratą danych i przeciwdziałać potencjalnym problemom operacyjnym. W zdecydowany sposób poprawia to stabilność, bezpieczeństwo i efektywność działań, wspierając jednocześnie ciągłość procesów i skuteczne zbieranie, przesyłanie i analizowanie danych. Przykład takiego rozwiązania dotyczącego pośredniego punktu dystrybucyjnego pokazano na rysunku 5.8.

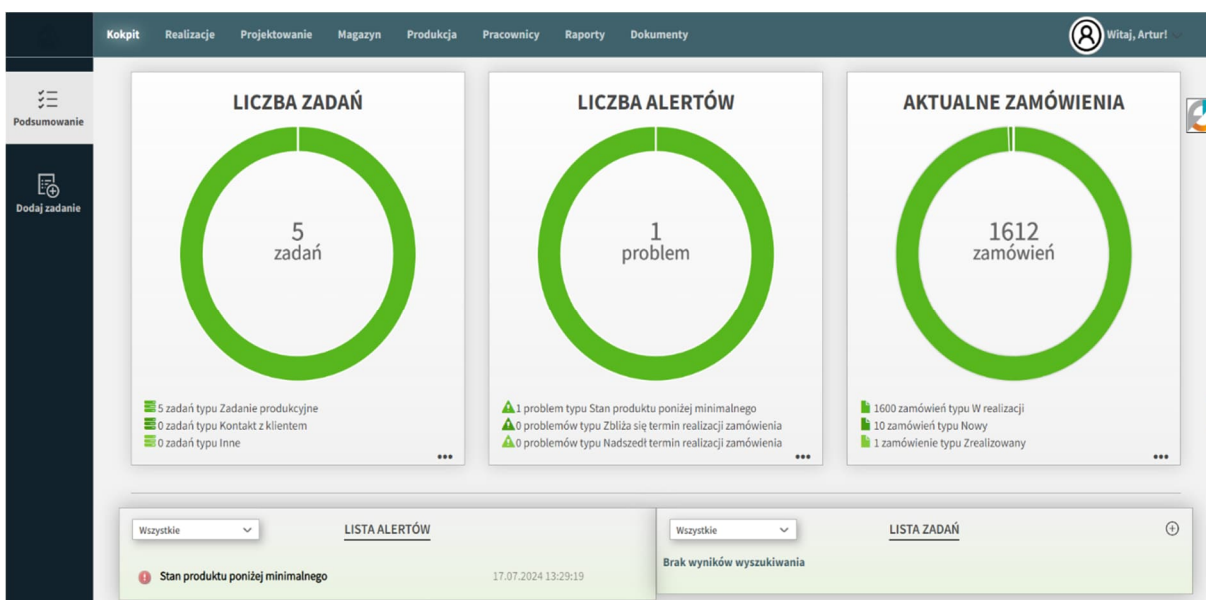


Rys. 5.8. IDS1 – pośredni punkt dystrybucyjny – schemat

Dostosowanie istniejącej linii produkcyjnej korpusu wodomierza w FAS do cyfryzacji oraz jej rozbudowa o niezbędne elementy infrastruktury przyniosły ze sobą szereg korzyści. Po pierwsze, wprowadzenie osieciowania linii na poszczególnych stanowiskach wraz z zainstalowaniem czujników stanowiskowych umożliwiło precyzyjne monitorowanie i zarządzanie procesem produkcyjnym. Integracja systemu adaptacyjnego sterowania produkcją opartego na zaprojektowanym dedykowanym dla FAS oprogramowaniu, polegająca na zaimplementowaniu w zbudowanym systemie oprogramowanego modelu decyzyjnego, pozwoliła na wprowadzenie zaawansowanego, dostosowanego do potrzeb FAS procesu kontroli przebiegu produkcji korpusów wodomierza. Kolejnym pozytywnym działaniem było skuteczne połączenie nowego systemu z obecnie dostępnymi rozwiązaniami w FAS, w tym z systemami obsługującymi procesy pomocnicze, takie jak gospodarka narzędziowa czy magazynowa, czego przykład pokazano na rysunku 5.9. To z kolei przyczyniło się do integracji różnych obszarów wspierających działania wytwórcze, poprawiając efektywność operacyjną i zwiększając spójność systemu, czego przykładem może być widok kokpitu systemu przedstawiony na rysunku 5.10, gdzie w przystępnej formie graficznej mogą być prezentowane wybrane informacje normalnie dostępne głębiej w systemie.



Rys. 5.9. Zrzut ekranu z systemu – interfejs do komunikacji z szafami narzędziowymi ISL i Sandvik



Rys. 5.10 Zrzut ekranu z systemu – kokpit – interfejs startowy

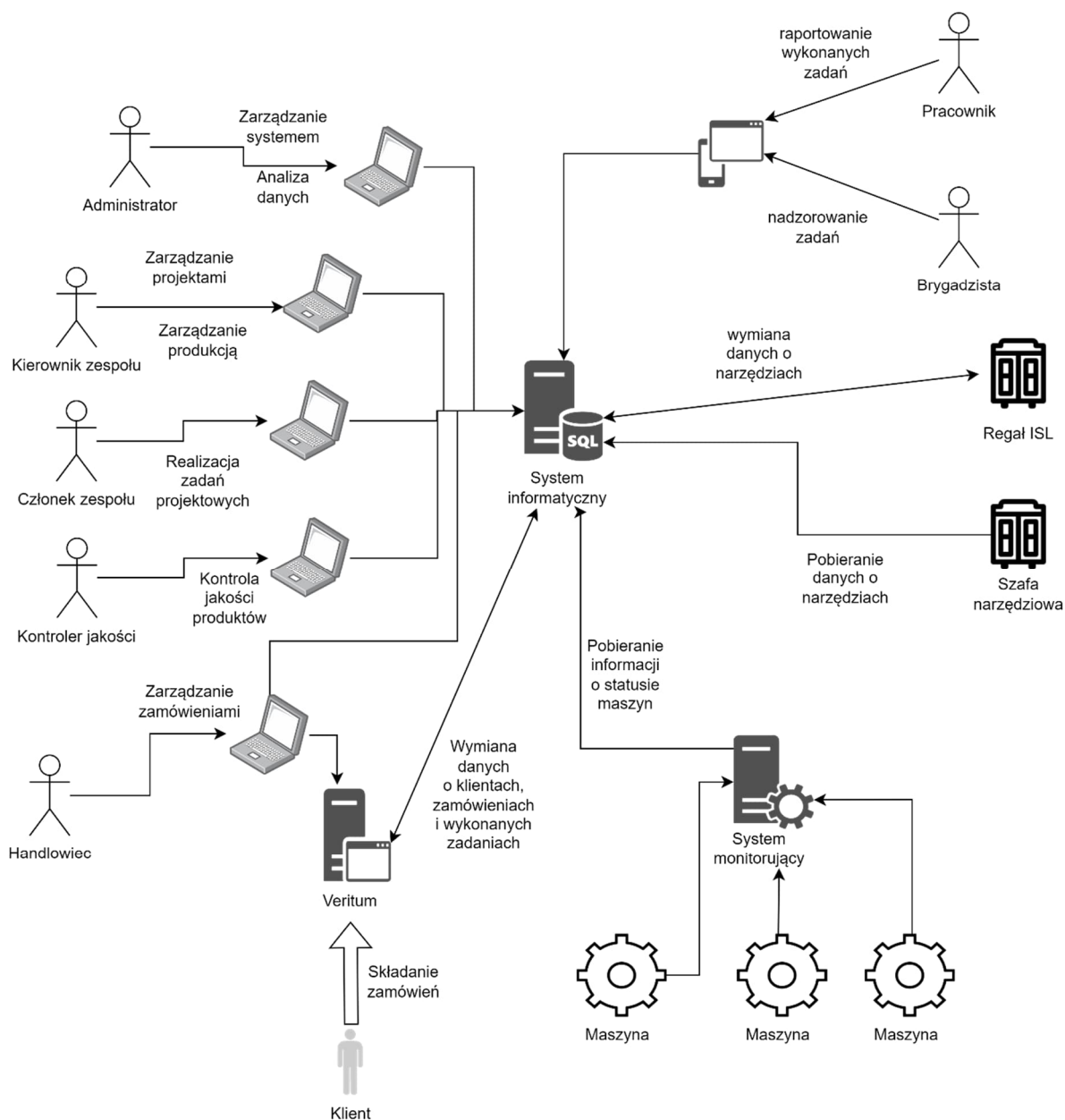
## 5.2. Oprogramowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego systemu sterowania produkcją

Skuteczne oprogramowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania produkcją korpusu wodomierza w FAS polegało na zintegrowaniu metod analizy danych oraz wspomagania decyzji na poziomie modelu decyzyjnego związanych z różnymi technikami wytwarzania. Główne prace obejmowały:

- opracowanie cyfrowego odwzorowania operacji technologicznych stosujących różne techniki wytwarzania,
- opracowanie cyfrowego odwzorowania procesu produkcyjnego, które integruje metody dla poszczególnych technik wytwarzania,

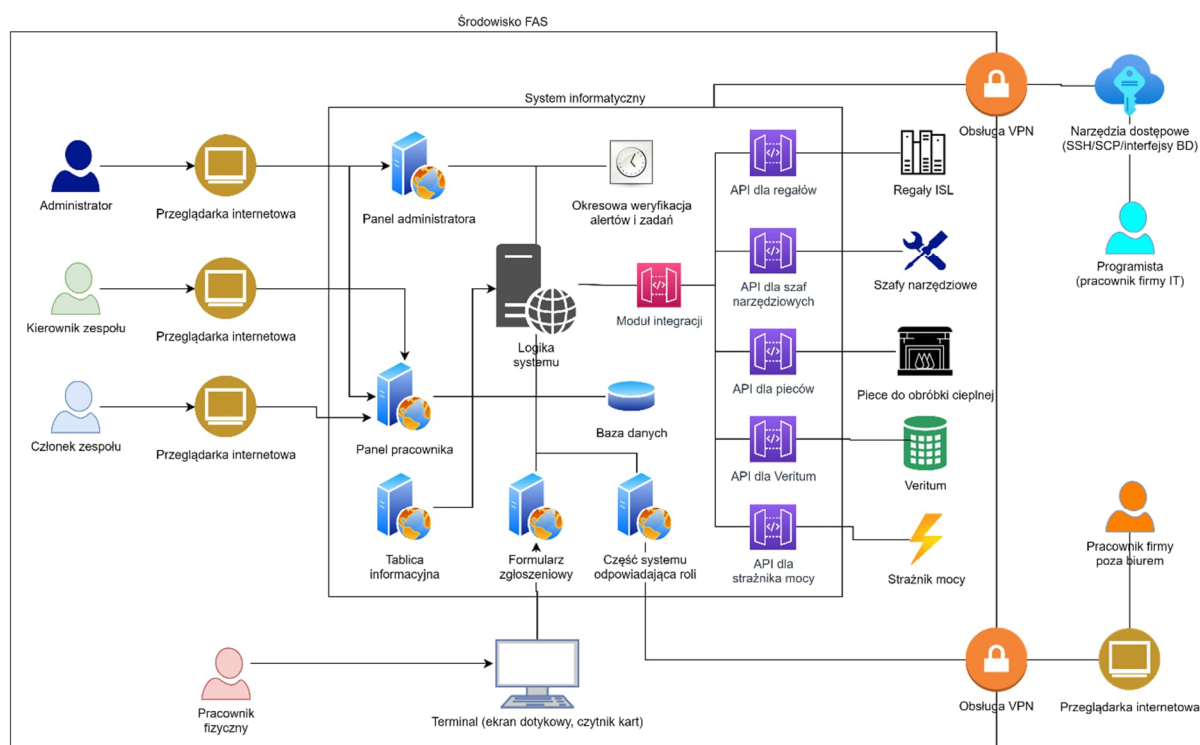
- oprogramowanie modelu decyzyjnego wspomagającego podejmowanie decyzji na podstawie prognozowania dla całego procesu produkcji.
- oprogramowanie metod wspomagania decyzji dla poszczególnych technik wytwarzania i czynników pomiarowych.

Celem zbudowanego oprogramowania było wsparcie pracowników FAS w zakresie analiz statystycznych cech jakościowych zidentyfikowanych w procesie produkcji korpusów wodomierzy. Bazą wyjściową do skutecznej integracji modułu analitycznego odpowiedzialnego za wspomaganie podejmowania decyzji było zrozumienie funkcjonowania i kontekstu dla całego systemu informatycznego FAS rozpatrując osadzenie go w środowisku biznesowym, co przedstawiono na rysunku 5.11.



Rys. 5.11. System informatyczny – diagram kontekstu

Z systemu informatycznego z wbudowanym modułem analitycznym mogą korzystać użytkownicy o różnych rolach i zakresie odpowiedzialności w środowisku FAS, a sam zbudowany nowy system informatyczny jest używany na równi z użytkowaną obecnie w przedsiębiorstwie aplikacją ERP Veritum, przechowującą dane o klientach, kadrach i zamówieniach. Dodatkowo, system komunikuje się (czasami tylko pobiera dane) z różnych urządzeń w środowisku wewnętrznym, takich jak zautomatyzowane regały wysokiego składowania, szafy wydające oraz maszyny i urządzenia, w tym piece do obróbki cieplnej. Uszczegóławiając budowę systemu od strony technicznej, system można podzielić na następujące kontenery przedstawione na rysunku 5.12.

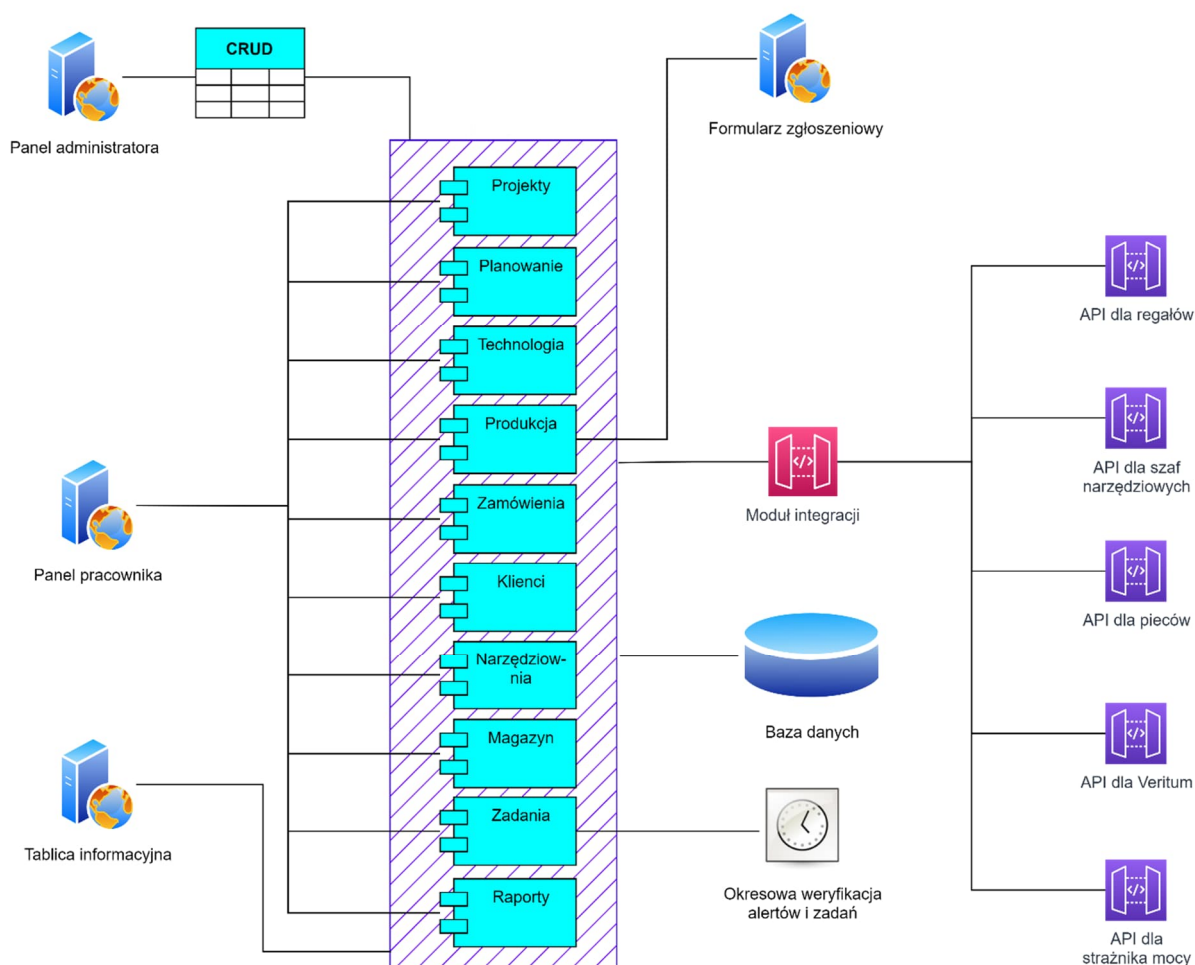


Rys. 5.12. System informatyczny w środowisku FAS – diagram kontenerów

System jest podzielony na wiele elementów, jednak należy wyróżnić trzy główne obszary:

- nowy system informatyczny FAS - system zrealizowany przez zespół IT, który realizuje funkcjonalności opisane w wymaganiach,
- środowisko FAS - elementy znajdujące się w przedsiębiorstwie FAS, połączone do wewnętrznej infrastruktury sieciowej,
- świat zewnętrzny - z zewnątrz możliwe jest uzyskanie dostępu do odpowiedniego komponentu (lub komponentów, w zależności od roli) systemu poprzez tunel VPN.

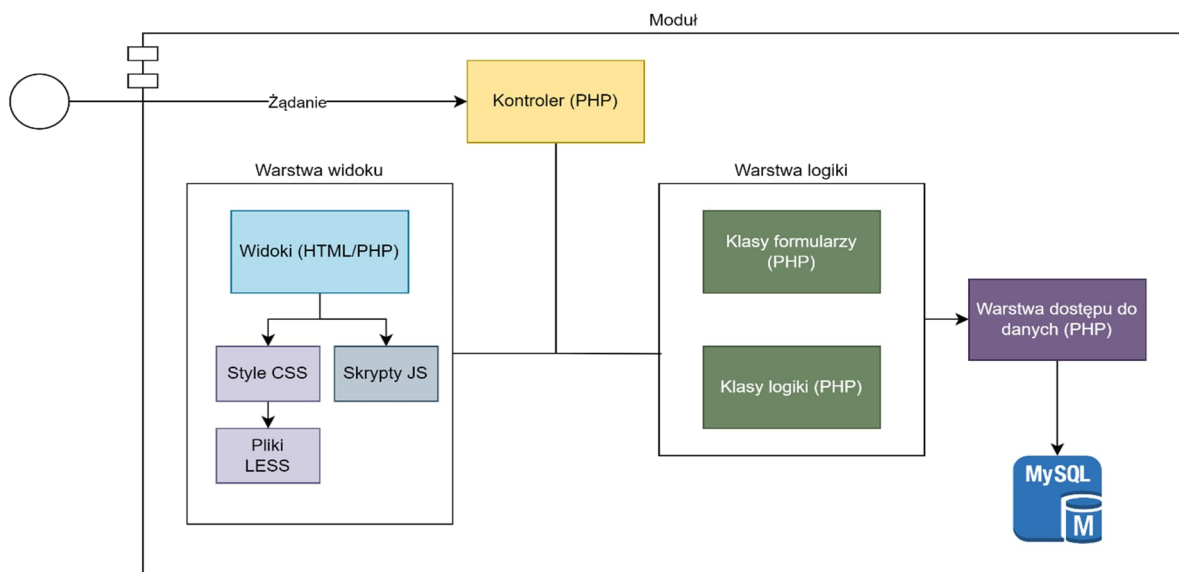
Wewnętrznie natomiast zaprojektowany system informatyczny podzielony jest w sposób przedstawiony na rysunku 5.13. Logikę stanowią połączone moduły dotyczące różnych sfer funkcjonowania przedsiębiorstwa. Podział na te aspekty nie jest definitywny - będzie się zmieniał (głównie zwiększał) wraz z dalszym rozwojem systemu.



Rys. 5.13. System informatyczny FAS – podział wewnętrzny

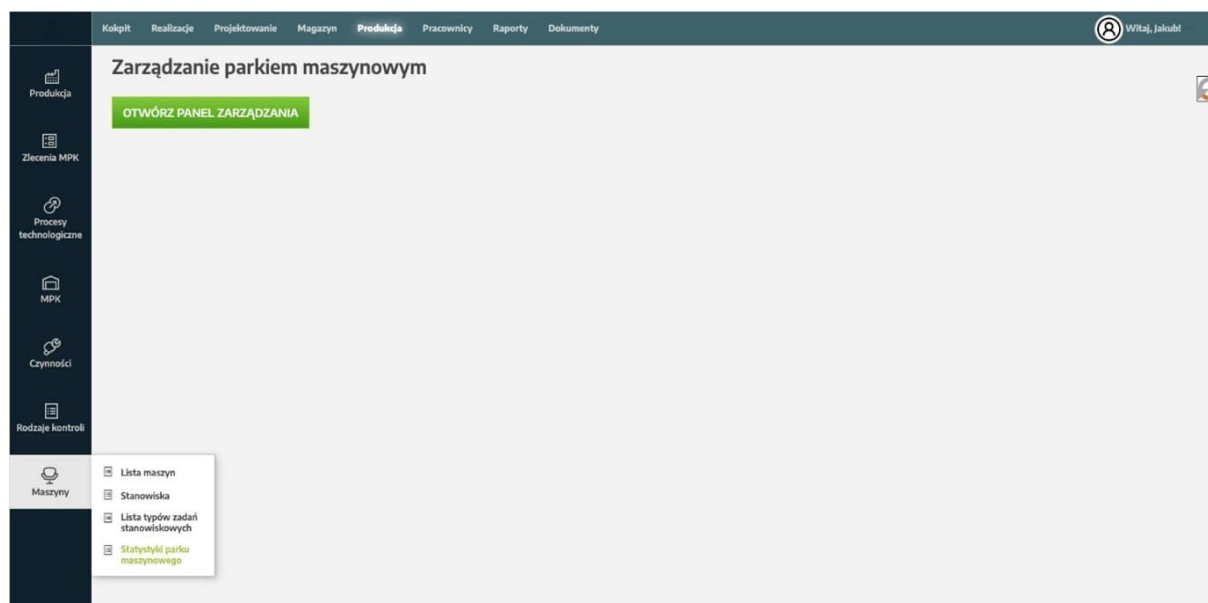
W budowanym systemie moduły są ze sobą powiązane i stanowią monolit. Jednakże, można wyróżnić typową budowę zbioru podobnych funkcji, składających się na jeden moduł co przedstawiono na rysunku 5.14. Zastosowano nowoczesny framework Yii 2, oparty o wzorzec MVC (Model-View-Controller), który wymusza rozdzielenie od siebie:

- kontrolerów - odpowiedzialnych za przyjmowanie żądania, kontrolę ról i komunikację modelu z widokiem,
- warstwy logiki - element warstwy modelu, odpowiadający za przeprowadzanie obliczeń i kontrolę danych wprowadzanych przez użytkownika,
- warstwy dostępu do danych - zbiór plików z zapytaniami i bezpośrednimi operacjami na bazie danych,
- warstwy widoku - generowanie strony internetowej widocznej dla użytkownika oraz skrypty CSS i JS wzbogacającymi wygląd oraz dynamikę.



Rys. 5.14. System informatyczny FAS – budowa typowego modułu

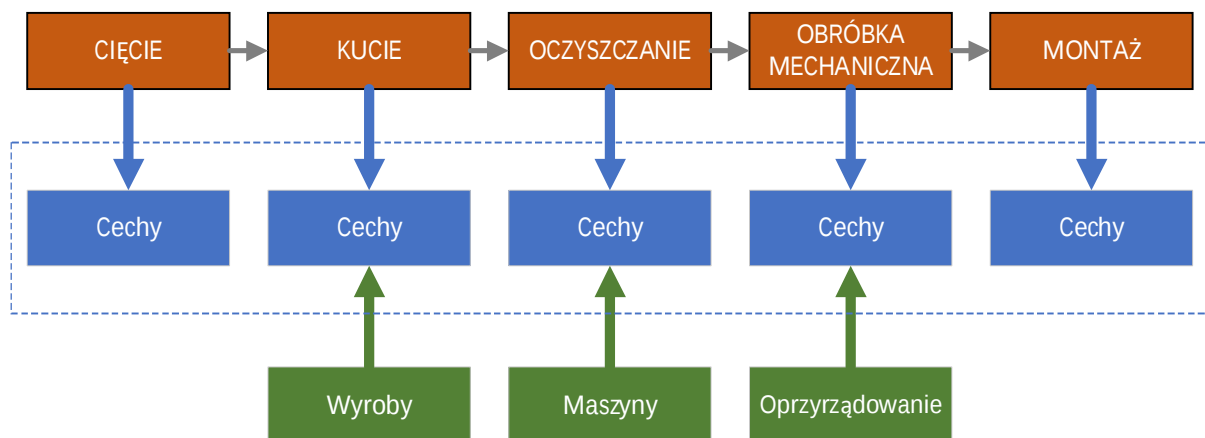
Uruchomienie modułu analitycznego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza wymaga natomiast od użytkownika systemu informatycznego FAS wyboru następującej ścieżki: moduł Produkcja → Maszyny → Statystyki parku maszynowego → Otwórz panel zarządzania, co przedstawiono na rysunku 5.15.



Rys. 5.15. Zrzut ekranu z systemu – interfejs do przejścia do modułu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza

Moduł analityczny zawiera informacje dotyczące struktury procesu produkcyjnego korpusu wodomierza oraz cech jakościowych podlegających monitorowaniu i analizie, a także przechowuje informacje dotyczące uzyskiwanych parametrów procesowych dla poszczególnych stanowisk wytwórczych. Struktura bazy danych obejmuje kolejne operacje technologiczne w procesie i zawiera dane takie jak: nazwa wyrobu, oznaczenie wyrobu, nazwa operacji technologicznej. Dla poszczególnych procesów technologicznych zdefiniowano w bazie cechy jakościowe charakterystyczne dla kolejnych operacji technologicznych. Tak zdefiniowane cechy odnoszą się do trzech składowych procesu: maszyn, wyrobu,

oprzyrządowania. Dzięki temu opracowano zbiory cech jakościowych dla poszczególnych operacji technologicznych, a także zostały ustanowione relacje pomiędzy tymi cechami, co przedstawiono na rysunku 5.16.



Rys. 5.16 Założenia struktury danych - definiowanie cech jakościowych dla procesu produkcji

Główne parametry definicyjne cech operacji określono jako: nazwa, jednostka miary, typ cechy. Przyjęto, iż typ cechy określa, jakie wartości graniczne należy zdefiniować z punktu widzenia spełnienia wymagań jakościowych. W tym celu przewidziano możliwość definiowania następujących typów cechy: nominanta, maksymanta, minimanta, alternatywny. Z kolei dla wszystkich cech typu nominanta zdefiniowano: wymiar nominalny (WM), górną linię tolerancji (GLT) oraz dolną linię tolerancji (DLT). Podstawą definiowania danych dla cech były charakterystyki krytyczne opracowane dla poszczególnych operacji w wyniku wcześniej przeprowadzonej analizy procesu produkcji korpusu wodomierza.

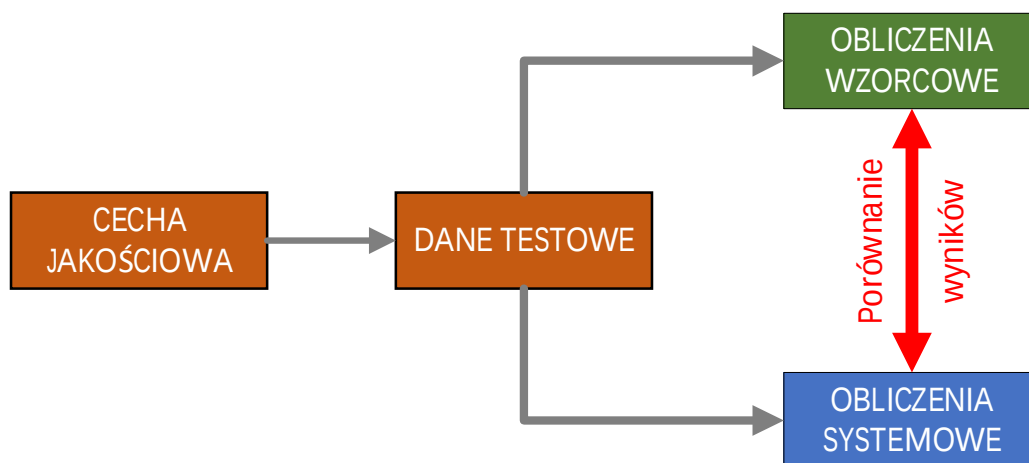
Dla procesu technologicznego produkcji korpusu wodomierza wyselekcjonowano metody i narzędzia statystyczne analizy danych biorąc pod uwagę charakterystykę cech tego procesu. W tym celu zastosowano środowisko Phytion. Przyjęto, iż każdy typ cechy ma przypisaną grupę narzędzi analizy w ramach, której są zdefiniowane konkretne narzędzia, tj.: statystyka opisowa, wykres przebiegu wartości cechy oraz wskaźnik zdolności jakościowej. Wykaz oprogramowanych narzędzi statystycznych przedstawiono na rysunku 5.17.

| aktywny | nazwa                    | funkcja                  | nominanta | minimanta | maksymanta | jakościowa | grupa_narzedzi     |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------|------------|------------|--------------------|
| Tak     | Średnia                  | srednia                  | Tak       | Tak       | Tak        | Nie        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Minimum                  | minimum                  | Tak       | Tak       | Tak        | Tak        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Maksimum                 | maksimum                 | Tak       | Tak       | Tak        | Tak        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Suma                     | suma                     | Tak       | Tak       | Tak        | Nie        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Rozstęp                  | rozstep                  | Tak       | Tak       | Tak        | Tak        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Wariancja                | wariancja                | Tak       | Tak       | Tak        | Nie        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Rozstęp międzykwartylowy | rozstep_miedzykwartylowy | Tak       | Tak       | Tak        | Tak        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Skosność                 | skosnosc                 | Tak       | Tak       | Tak        | Nie        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Kurtatoza                | kurtotoza                | Tak       | Tak       | Tak        | Nie        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Kwartył 1                | kwartyl1                 | Tak       | Tak       | Tak        | Tak        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Kwartył 3                | kwartyl3                 | Tak       | Tak       | Tak        | Tak        | Statystyka opisowa |
| Tak     | Wskaźnik Cp              | zdnosc_jakosciowa_cp     | Tak       | Nie       | Nie        | Nie        | Wykresy            |

Rys. 5.17. Zrzut ekranu modułu analitycznego – wykaz oprogramowanych narzędzi statystycznych

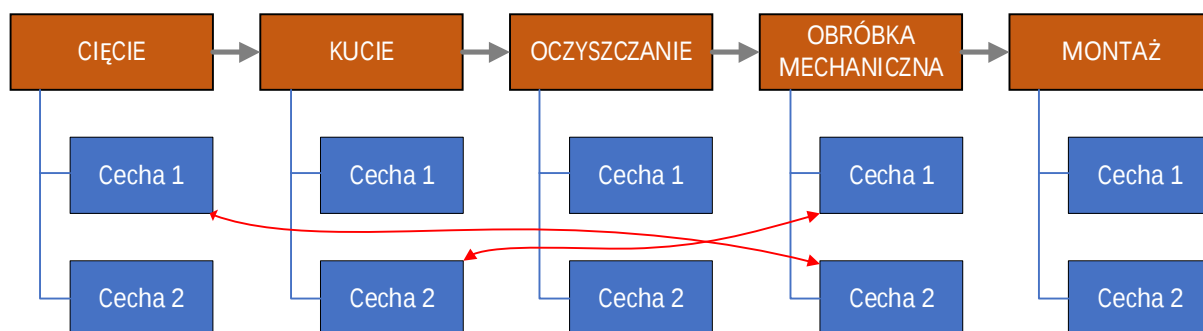
Podstawą do przeprowadzenia odpowiednich analiz są uzyskane dane pomiarowe dla konkretnej cechy jakościowej. Przygotowana struktura bazy danych pozwala na przypisanie każdego pomiaru do: wyrobu, zlecenia produkcyjnego, operacji technologicznej, maszyny. Z każdym pomiarem jest także powiązana etykieta danych pomiaru. Każdy pracownik FAS chcący wygenerować analizę statystyczną musi podać następujące dane: wyrób, cecha, zlecenie produkcyjne, data start, data stop. Dzięki temu dokładnie określany jest zakres analizy do przeprowadzenia z konkretnego zbioru danych pomiarowych. Pozwala to z tak przygotowanego zbioru, w kolejnym kroku wybrać narzędzie, które będzie zastosowane do przeprowadzenia oczekiwanej analizy.

Wykonywane przez zespół programistów IT kody algorytmów obliczeniowych i decyzyjnych podlegały bieżącym testom w zakresie testów jednostkowych – przeprowadzanych na poziomie kodu źródłowego. Związane to było z testowaniem pojedynczych metod i komponentów systemu. Celem tego procesu było wykrycie błędów natychmiast po ich pojawieniu się. Po wykryciu i poprawieniu nieprawidłowości realizowane były testy potwierdzające (regresywne). Polegały one przede wszystkim na ponownym sprawdzeniu oprogramowania pod kątem znalezienia ukrytych wad i błędów. Celem testów weryfikacyjnych było uzyskanie wzorcowych danych obliczeniowych uwzględniających wybrane metody i zasady. W dalszej kolejności ten sam zbiór danych został zdefiniowany w systemie informatycznym, dla których wygenerowano wyniki. Obliczenia zostały przeprowadzone dla testowych danych pomiarowych wygenerowanych na podstawie charakterystyki danej cechy. Założenia te przedstawiono na rysunku 5.18.



Rys. 5.18. Założenia dla przeprowadzonej weryfikacji narzędzi i metod analiz danych

Oprogramowanie prototypu algorytmów modelu decyzyjnego dla całego procesu produkcji korpusu wodomierza obejmowało opracowanie algorytmu zawierającego metody i reguły wspomagani decyzji pozwalające na określenie korelacji danych cech jakościowych w procesie produkcji korpusów wodomierza. Taka funkcjonalność została zaimplementowana w kolejnym module pozwalając zdefiniować zależności pomiędzy cechami podlegającymi w całym procesie technologicznym. Obejmowała ona także możliwość definiowania relacji pomiędzy cechami w obrębie danej operacji technologicznej jak i pomiędzy operacjami technologicznymi, co przedstawiono na rysunku 5.19.



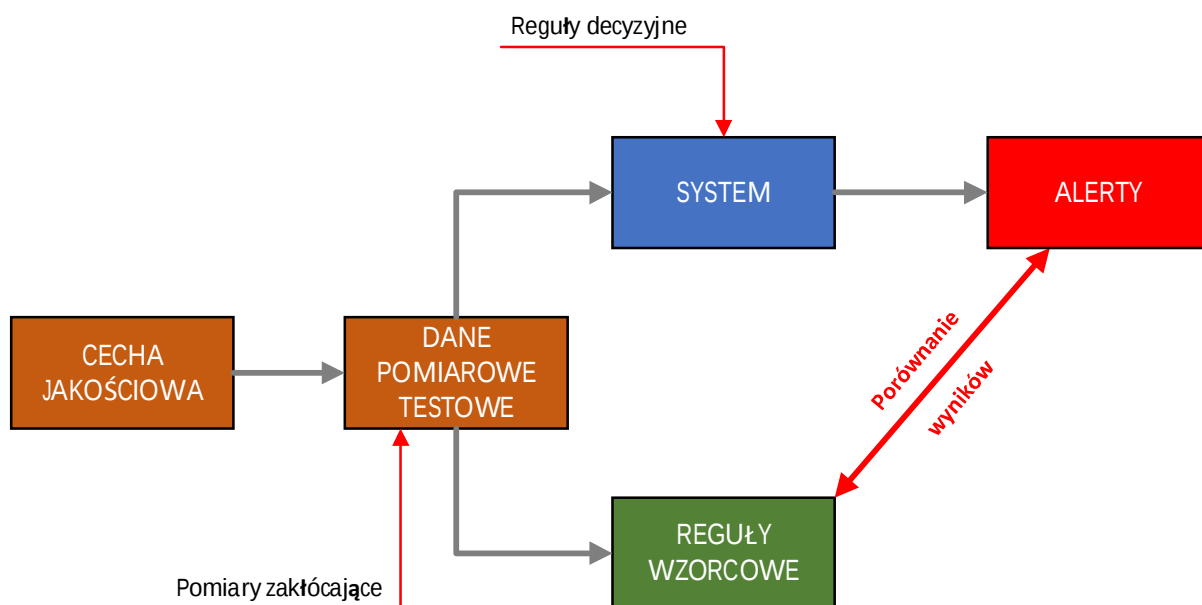
Rys. 5.19. Założenia dla oprogramowania reguł decyzyjnych w procesie produkcji korpusu wodomierza

Dzięki ustawieniu relacji pomiędzy cechami możliwe było uzyskanie wpływu na:

- wskazanie korekty wartości danej cechy pomiarowej w wyniku wystąpienia zmiany wartości dla cechy zależnej,
- wskazanie na zagrożenie osiągnięcia wartości innej cechy w tej samej lub innej operacji,
- zdefiniowanie alertów określających przekroczenie wartości danej cechy pomiarowej.

Ustalenie takich zależności polegało w tym przypadku na wskazaniu cech zależnych oraz zdefiniowaniu poziomów alertów. Takich alertów może być wiele i mogą przyjmować postać dyskretną lub przedział wartości, zgodnie ze zdefiniowanymi jednostkami miary dla danej cechy. Jest to połączone z kolejną ważną funkcjonalnością modułu, a mianowicie z generowaniem komunikatów informujących o wystąpieniu odchyleń od ustalonych wartości granicznych cech jakościowych oraz zdefiniowanych reguł decyzyjnych. Tego typu alerty są automatycznie generowane przez system informatyczny informując o przekroczeniu lub nieosiągnięciu wartości granicznych. Dla przykładu w przypadku cechy typu nominanta alerty są generowane po przekroczeniu wartości maksymalnej oraz nieosiągnięciu wartości minimalnej. Zdefiniowane reguły zależności pomiędzy cechami są wartościami granicznymi, które po analizie danych pomiarowych pozwalają stwierdzić o występującym zakłóceniu w procesie produkcji. Przekroczenie zdefiniowanych wartości sterujących i granicznych wyzwała automatyczne generowanie alertów systemowych, co umożliwia podjęcie przez pracownika FAS działań w celu wyeliminowania odstępstwa/problemu – podjęciu działań adaptacyjnych – korygujących w procesie produkcji korpusu wodomierza.

Wykonywane przez system informatyczny algorytmy decyzyjne podlegały bieżącym testom, które były przeprowadzane na poziomie kodu źródłowego. Polegały one na testowaniu pojedynczych metod i obiektów. Przeprowadzenie testowania służyło wykryciu błędów natychmiast po ich pojawieniu się. Podstawą dla testów weryfikacyjnych modułu analitycznego do sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza były przygotowane wzorcowe reguły występujące pomiędzy cechami jakościowymi w procesie produkcji. W celu weryfikacji posłużono się wygenerowanymi danymi pomiarowymi wzorcowymi. Przy czym do danych tych wprowadzono zakłócenia – wartości cech, których wystąpienie powinno uruchomić alert informacyjny. Założenia te przedstawiono na rysunku 5.20.



Rys. 5.20 Założenia dla przeprowadzonej weryfikacji reguł decyzyjnych

Wyniki testów wykazały, że algorytmy systemu obejmujące regułowe sterowanie w procesie produkcji korpusu wodomierza działają w sposób prawidłowy – nie stwierdzono błędów krytycznych. Potwierdzono, że wszystkie moduły systemu działają w sposób prawidłowy i poprawiają efektywność procesu diagnozy i wskazania rozwiązania problemów występujących w procesie produkcji korpusu wodomierza.

## 6. WALIDACJA SYSTEMU DO ADAPTACYJNEGO STEROWANIA PRODUKCJĄ KORPUSU WODOMIERZA

Walidacja systemu do adaptacyjnego sterowania produkcją korpusu wodomierza polegała na przeprowadzeniu badań, których celem było potwierdzenie efektywności i potencjału zastosowania zbudowanego systemu w warunkach rzeczywistego procesu w zakładzie produkcyjnym FAS. Dążąc do uzyskania obiektywnego potwierdzenia i osiągnięcia zakładanych efektów, jakimi było po pierwsze skrócenie czasu przejścia materiału przez proces produkcyjny, po drugie ograniczenie liczby braków oraz po trzecie wzrost wskaźnika OEE wykonano testy funkcjonalności oraz przydatności systemu na bieżących danych produkcyjnych.

W kontekście globalnego rynku, dążenie do skrócenia czasu przejścia materiału przez cały proces produkcyjny ma zasadnicze znaczenie dla efektywności i konkurencyjności przedsiębiorstw. Nieoczekiwane oraz dynamiczne zmiany na rynku wymagają sprawnego dostosowania się do nowych tworzących się warunków gospodarczych, czego nieodzownym elementem jest doskonalenie procesów. Redukcja oraz stałe monitorowanie czasu przejścia konkretnego materiału przez proces produkcji umożliwia przedsiębiorstwom zwiększenie elastyczności, co pozwala na błyskawiczne reagowanie na zmieniające się trendy rynkowe, fluktuacje popytu oraz nowe wyzwania konkurencyjne.

Dbłość o minimalizację czasu na wytworzenie danego produktu, począwszy od dostawy materiału, a skończywszy na wysyłce wyrobu gotowego do klienta powinna być elementem strategii biznesowej każdej organizacji. Efektywność operacyjna, elastyczność w dostosowywaniu się do zmian oraz zdolność do szybkiego reagowania na potrzeby rynkowe stają się fundamentem rozwoju przedsiębiorstw, wspierając wzrost gospodarczy i umożliwiając inwestycje w nowoczesne technologie oraz innowacyjne rozwiązania.

Metodą, jaką zastosowano w trakcie badania czasu przejścia materiału przez proces produkcyjny, było VSM, czyli mapowanie strumienia wartości. Dzięki wykorzystaniu tej metody dokonano analizy procesu produkcyjnego korpusu wodomierza, identyfikując etapy, operacje oraz ewentualne opóźnienia czy straty czasowe. Szczególną uwagę zwracano na czas przejścia materiału od momentu dostarczenia materiału do magazynu do momentu wyjścia wyrobów z procesu (realizacja wysyłki do klienta końcowego) jako jedną z kluczowych miar efektywności.

W ramach badania funkcjonalności systemu skupiono się na praktycznym zastosowaniu zdobytej wiedzy z VSM do poprawy efektywności produkcji. Celem było wprowadzenie istotnych zmian w procesie produkcyjnym za pomocą systemu adaptacyjnego sterowania, uwzględniając analizę czasu, a także poprawę ogólnej jakości i doskonalenia operacji. Przeprowadzono testy, których przedmiotem była ocena wpływu rozwiązań cyfryzacji w sterowaniu procesem produkcji wodomierza na efektywność przepływu materiału. Do oceny weryfikacyjnej z wykorzystaniem metody VSM opracowano mapę całego procesu produkcji korpusu wodomierza. Mapa tego typu pozwala na zobrazowanie przepływu materiałów i informacji w procesach związanych z realizacją zamówień. Przygotowanie mapy wymaga

zebrania odpowiednich danych i dokonanie ich analizy. Poniżej zestawiono listę informacji, które były istotne podczas tworzenia mapy VSM:

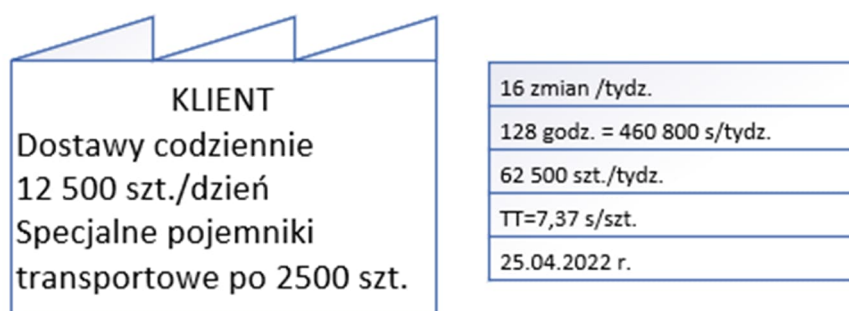
1. Dane wejściowe:
  - Jakie surowce lub informacje są wprowadzane do procesu?
  - Skąd pochodzą te surowce i jak są dostarczane?
2. Wartość dodana:
  - Gdzie dokładnie w procesie dodawana jest wartość dla klienta?
  - Które etapy procesu są bezpośrednio związane z tworzeniem produktu?
3. Operacje i etapy procesu:
  - Jakie są poszczególne kroki lub etapy w procesie?
  - Jak długo trwa każdy z tych etapów?
  - Jakie są główne operacje wykonywane w ramach każdego etapu?
4. Czas przepływu:
  - Jaka jest łączna długość czasu trwania procesu od początku do końca?
  - Jaka jest długość czasu trwania dla każdego z etapów?
5. Zasoby:
  - Jakie zasoby są wykorzystywane w poszczególnych etapach procesu? (np. ludzie, maszyny, narzędzia)
  - Jakie są ilości wykorzystywanych zasobów?
6. Opóźnienia i oczekiwania:
  - Czy istnieją opóźnienia pomiędzy poszczególnymi etapami?
  - Gdzie występują czasy oczekiwania?
7. Transport i przechowywanie:
  - Jakie są środki transportu używane w procesie?
  - Czy istnieją magazyny lub miejsca przechowywania pomiędzy etapami?
8. Marnotrawstwo (ang. Waste):
  - Czy można zidentyfikować marnotrawstwo w procesie? (m.in.: nadprodukcja, opóźnienia, oczekiwanie, nadmiarowe przechowywanie)
  - Gdzie występuje najwięcej marnotrawstwa?
9. Wskaźniki wydajności:
  - Jakie wartości przyjmują ustanowione kluczowe wskaźniki wydajności dla poszczególnych etapów?
  - Jakie są cele wydajnościowe dla całego procesu?
10. Popyt klienta:
  - Jaki jest rzeczywisty popyt klienta?
  - Jakie są oczekiwania klienta dotyczące czasu dostarczenia i jakości?

Warto zauważyć, że dokładność i użyteczność mapy VSM zależą od dokładności zebranych danych. Dlatego ważnym było zaangażowanie zespołów pracowniczych i zarządzających w proces mapowania, co skutkowało uzyskaniem pełniejszego obrazu sytuacji i pozwoliło zidentyfikować obszary, które mogą zostać poddane poprawie.

W celu realizacji zadania badawczego przygotowano mapę procesu w okresach przed działaniami i po działaniach wprowadzających rozwiązania będące przedmiotem wdrożenia w ramach realizacji pracy doktorskiej. Mapy zostały sporządzone zgodnie z obowiązującą metodyką i zastosowaniem klasycznych ikon graficznych.

- I. Mapa procesu (VSM) – stan procesu przed wprowadzaniem rozwiązań cyfryzacji do adaptacyjnego sterowania procesem:
  - wymagania klienta:

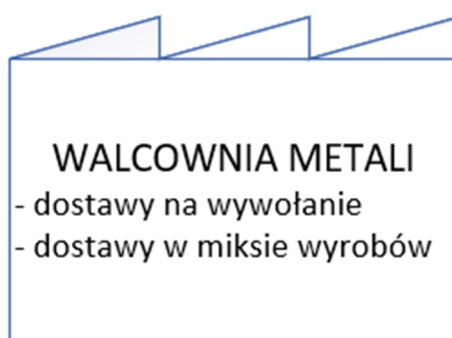
Przeanalizowane dane związane z popytem klientów na wyroby gotowe. W tym celu na podstawie danych sprzedaży określono zapotrzebowanie na korpusy wodomierza z okresu 6 miesięcy poprzedzających sporządzenie mapy. Na tej podstawie wyznaczono średnie dzienne zapotrzebowanie - główny parametr charakteryzujący wymagania klienta. Zebrano także inne informacje związane z wymaganiami klienta, np.: forma transportu (pojemniki) czy częstość wysyłek. Na rysunku 6.1 przedstawiono zobrażowane wymagania klienta.



Rys. 6.1 Zobrażowane wymagania klienta

- charakterystyka dostaw materiałów:

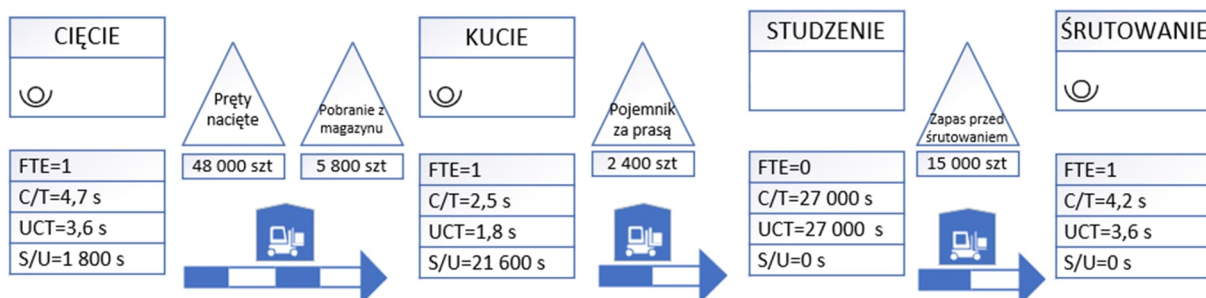
Ten obszar związany z realizacją przepływu materiałów został pominięty w analizach z uwagi na dużą nieprzewidywalność w zakresie dostaw miedzi czy dużymi wahaniami cen zakupu. Z tego względu branie pod uwagę tego parametru zakłócałoby wynik całkowity związany z przepływem materiałów. Na mapie uwzględniono jedynie ogólną charakterystykę dostaw, co przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2 Zobrażona charakterystyka dostaw materiałów

- charakterystyka procesu produkcji:

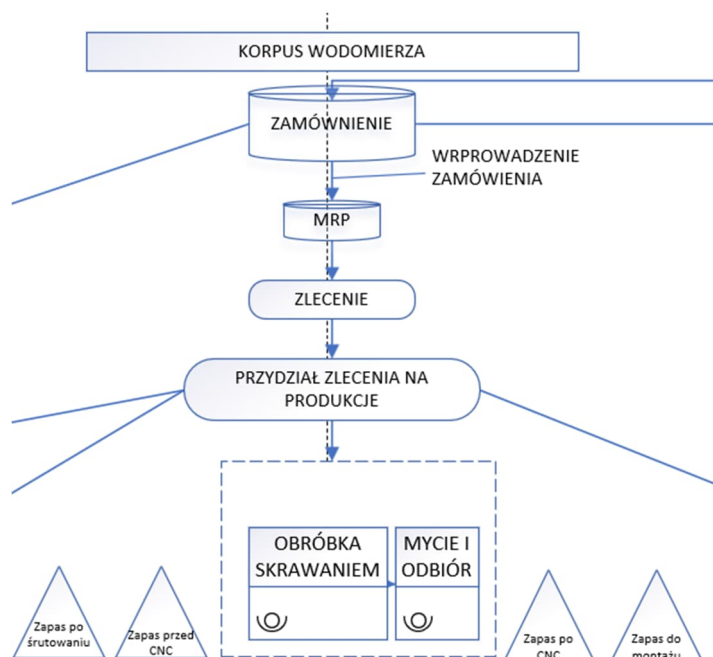
Kolejny etap dotyczył zebrania danych dotyczących charakterystyki kolejnych operacji procesu produkcji. Zebrano dane dotyczące: ilości pracowników biorących udział w procesie (ang. FTE - Full-time equivalent), czasu cyklu (ang. C/T - Cycle time), czasu jednostkowego (ang. UCT - Unit cycle time), czasu przebrojenia (ang. S/U - Set Up). Na rysunku 6.3 przedstawiono fragment procesu produkcji – wybrane operacje i ich parametry realizacji.



Rys. 6.3 Wskazane miejsca i ilości zapasów w procesie produkcji

- przepływ informacji:

Po analizie procesu produkcji przeprowadzono identyfikację i formę kanałów przepływu informacji. W wyniku tego powstało odzwierciedlenie kierunków i komórek organizacyjnych uczestniczących w podejmowaniu decyzji produkcyjnych. Fragment mapy uwzględniający tę analizę przedstawiono na rysunku 6.4.



Rys. 6.4 Przepływ informacji w procesie

- linia czasu:

Efektem końcowym przygotowania mapy przepływu jest linia czasu. Linia ta zawiera informacje o: czasie przejścia materiału w procesie (ang. LT - Lead Time), czasie przetwarzania 1 sztuki materiału w procesie (ang. VAD - Value Added Time) oraz udziale czasu przetwarzania w całym czasie przejścia materiału (ang. VATR - Value Added Time Ratio =  $VAD/LT \cdot 100\%$ ).

Parametry te wskazują jaka jest efektywność procesu i jaki jego etap ma największy wpływ na ten parametr. Na rysunku 6.5 przedstawiono podsumowanie dla mapy procesu produkcji korpusu wodomierza, natomiast całe mapy procesu dla stanu przed zastosowaniem technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza zostały zamieszczone w załącznikach Z.30-Z.31.

|          |          |         |
|----------|----------|---------|
| 231,13 h | 231,14 h | 0,003 % |
| 24,78 s  |          |         |

Rys. 6.5 Wyniki analizy procesu produkcji korpusu wodomierza – stan przed wprowadzaniem zmian – analiza 1

Uzyskane wyniki wskazują, że:

- czas przejścia materiału w procesie w okresie przed wprowadzeniem rozwiązań cyfryzacji wynosił 231,14 h,
- czas przetwarzania 1 sztuki materiału w procesie wynosił – 24,78 s.
- udział czasu przetwarzania w całym czasie przejścia materiału wynosił 0,003%.

## II. Mapa procesu po wprowadzeniu rozwiązań cyfryzacji do adaptacyjnego sterowania procesem

Po wprowadzeniu pilotażowym w procesie produkcji korpusów wodomierza rozwiązań będących przedmiotem badań ponownie przeprowadzono procesy mapowania. Zostały one zrealizowane według takich samych zasad i etapów jak w przypadku map opisujących stan procesu przed wprowadzaniem zmian. Opracowane mapy dotyczące procesu w trakcie i po wprowadzeniu rozwiązań cyfryzacji do adaptacyjnego sterowania procesem zostały zamieszczone w załączniku Z.32-Z.35.

Opracowane mapy przepływu materiałów i informacji były podstawą do określenia efektów i wpływu rozwiązań adaptacyjnego sterowania i cyfryzacji na funkcjonowanie procesu produkcji korpusu wodomierza. W tabeli 6.1 przedstawiono zestawienie porównawcze parametrów realizacji procesu produkcji wodomierza.

Tab. 6.1 Zestawienie porównawcze parametrów realizacji procesu produkcji wodomierza

| Parametr procesu                                                            | Analiza 1    | Analiza 2    | Analiza 3    | Analiza 4    | Analiza 5    |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Czas przetwarzania (VAD)</b>                                             | 24,78 s      | 24,78 s      | 24,78 s      | 24,08 s      | 22,54 s      |
| <b>Czas przejścia materiału w procesie (LT)</b>                             | 231,14 h     | 199,19 h     | 184,55 h     | 174,20 h     | 131,16 h     |
| <b>Udział czasu przetwarzania w całym czasie przejścia materiału (VATR)</b> | 0,003 %      | 0,003 %      | 0,004 %      | 0,004 %      | 0,005 %      |
| <b>Zapasy</b>                                                               | 204 300 szt. | 164 200 szt. | 161 000 szt. | 145 600 szt. | 118 500 szt. |

Wyniki wskazują, że podjęte działania miały bez wątpienia pozytywny wpływ na efektywność procesu produkcji korpusów wodomierza. Równocześnie ze skróceniem czasu przejścia materiału w procesie (LT), czas przetwarzania (VAD) uległ zmniejszeniu. Powodem było zapewnienie stabilności w zakresie spływu wyrobów w poszczególnych operacjach procesu. W efekcie wzrósł udział czasu przetwarzania w całym czasie przejścia materiału (VATR). Co więcej, mniejsza liczba zapasów (głównie produkcji w toku) spowodowała, że czas pobytu materiałów w procesie także uległ zmniejszeniu. Podsumowanie zmian % parametrów procesu związanych z przepływem materiału po zakończeniu procesu cyfryzacji w stosunku do stanu sprzed rozpoczęcia procesu cyfryzacji zestawiono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2 Zmiana % parametrów procesowych związanych z przepływem materiału po zakończeniu procesu cyfryzacji

| Parametr procesu                                                     | Zmiana % po zakończeniu procesu cyfryzacji |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Czas przetwarzania (VAD)                                             | - 9%                                       |
| Czas przejścia materiału w procesie (LT)                             | - 43%                                      |
| Udział czasu przetwarzania w całym czasie przejścia materiału (VATR) | 67%                                        |
| Zapasy                                                               | - 42%                                      |

Konkurencyjne globalne środowisko biznesowe w jakim funkcjonuje przedsiębiorstwo FAS, determinuje jego kadrę zarządzającą do monitorowania poza wskaźnikami dotyczącymi przepływu materiału w procesie produkcji również, jako równoważnych wskaźników dotyczących jakości wytwarzanych produktów. Interpretacja wskaźników służących do monitorowania poziomu wyrobów wadliwych jest istotnym krokiem w procesie zarządzania jakością. Poprawne zrozumienie i analiza otrzymanych danych pozwala na skuteczne podejmowanie decyzji dotyczących procesu produkcyjnego oraz identyfikację obszarów wymagających ulepszeń. Interpretacja wyników dostarcza cennych informacji na temat trendów jakościowych oraz potencjalnych przyczyn wadliwości, w czym wydatną pomoc niesie zaimplementowany system do adaptacyjnego sterowania produkcją oparty na wdrożonych rozwiązaniach cyfrowych. W tym kontekście do analizy jego skuteczności przyjęto poziom brakowości (ang. SC – Scrap ratio). Wskaźnik SC dla korpusów wodomierza to stosunek ilości wyprodukowanych wadliwych korpusów do całkowitej ilości wyprodukowanych korpusów w danym okresie czasu. W tabeli 6.3 zestawiono dane dotyczące jego wartości w roku 2023 z podziałem na poszczególne miesiące, natomiast w tabeli 6.4 dane dotyczące roku 2024 do końca miesiąca maja, gdzie dysponowano zebranymi i opracowanymi danymi.

Tab. 6.3 Poziom braków (SC) dla korpusów wodomierzy w 2023 r.

| Korpusy wodomierza 2023 r. |                      |                         |                    |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| Miesiąc                    | Liczba braków (szt.) | Liczba sprzedaży (szt.) | Poziom braków (SC) |
| 1                          | 1 761                | 316 264                 | 0,55%              |
| 2                          | 2 741                | 235 914                 | 1,15%              |
| 3                          | 2 737                | 299 434                 | 0,91%              |
| 4                          | 4 610                | 214 392                 | 2,11%              |
| 5                          | 2 026                | 286 470                 | 0,70%              |
| 6                          | 1 730                | 357 147                 | 0,48%              |
| 7                          | 967                  | 219 660                 | 0,44%              |

|    |               |                  |              |
|----|---------------|------------------|--------------|
| 8  | 1 579         | 227 000          | 0,69%        |
| 9  | 1 586         | 257 584          | 0,61%        |
| 10 | 1 956         | 186 367          | 1,04%        |
| 11 | 3 480         | 234 796          | 1,46%        |
| 12 | 1 674         | 138 334          | 1,20%        |
|    | <b>26 847</b> | <b>2 973 362</b> | <b>0,94%</b> |

Tab. 6.4 Poziom braków (SC) dla korpusów wodomierzy do maja 2024 r.

| Korpusy wodomierza 2024 r. |                      |                         |                    |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| Miesiąc                    | Liczba braków (szt.) | Liczba sprzedaży (szt.) | Poziom braków (SC) |
| 1                          | 1 337                | 377 111                 | 0,35%              |
| 2                          | 1 212                | 227 600                 | 0,53%              |
| 3                          | 2 544                | 289 047                 | 0,87%              |
| 4                          | 1 804                | 356 558                 | 0,50%              |
| 5                          | 1 206                | 256 877                 | 0,47%              |
|                            | <b>8 103</b>         | <b>1 507 193</b>        | <b>0,53%</b>       |

Uzyskane wyniki ponownie wskazują, iż podjęte działania miały pozytywny wpływ na proces produkcji korpusów wodomierza również w ujęciu jakościowym. W badanym okresie średni miesięczny poziom brakowości uległ obniżeniu, uzyskując na koniec maja 2024 r. średniomiesięczną wartość 0,53%, co w stosunku do średniej miesięcznej za 2023 r. wynoszącej 0,94%, wykazało poprawę o 0,41%. Problemem cały czas pozostaje niestabilność procesu produkcyjnego, w którym liczba braków w danym miesiącu nie jest bezpośrednio powiązana z liczbą wyprodukowanych sztuk. Natomiast i na tym polu widać zdecydowaną poprawę. W 2023 r. największy rozstęp w liczbie braków pomiędzy miesiącami wynosił 1,67% (kwiecień 2023 r. do lipca 2023 r.), a w 2024 r. już tylko 0,52% (marzec 2024 r. do stycznia 2024 r.).

Ostatnim monitorowanym wskaźnikiem pozwalającym na walidację systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza był wskaźnik określający efektywność wykorzystania maszyn i urządzeń wykorzystywanych w tym procesie. Wskaźnik OEE jest wszechstronnym narzędziem pomagającym nie tylko w monitorowaniu wydajności produkcji, ale OEE pozwala także na określenie, jak skutecznie wykorzystywane są zasoby produkcyjne w przedsiębiorstwie. Poprzez monitorowanie OEE, przedsiębiorstwa mogą ocenić czy ich linie produkcyjne pracują zgodnie z oczekiwaniami czy też istnieją obszary do poprawy. Wskaźnik OEE dla procesu produkcji korpusów wodomierza to iloczyn: dostępności, wydajności i jakości. W tabeli 6.5 zestawiono dane dotyczące jego wartości w roku 2023 z podziałem na poszczególne miesiące, natomiast w tabeli 6.6 dane dotyczące roku 2024 do końca miesiąca maja, gdzie dysponowano zebranymi i opracowanymi danymi. W tabeli 6.7 przedstawiono natomiast wyrażoną w punktach procentowych (p.p.) zmianę wskaźnika OEE dla poszczególnych maszyn i urządzeń w miesiącach I-V w roku 2023 r., w stosunku do miesięcy I-V w roku 2024 r., w których w trakcie wdrażania był już system adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza.

Tab. 6.5 Poziom efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń (OEE) dla procesu produkcji korpusów wodomierzy w 2023 r.

| Wskaźnik OEE (%) - proces produkcji korpusu wodomierza 2023 r. |         |    |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     |
|----------------------------------------------------------------|---------|----|-----|----|----|----|-----|------|----|----|----|-----|
|                                                                | Miesiąc |    |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     |
| Maszyna/<br>urządzenie                                         | I       | II | III | IV | V  | VI | VII | VIII | IX | X  | XI | XII |
| ADIGE CM 601 (1)                                               | 81      | 83 | 82  | 80 | 84 | 86 | 82  | 81   | 83 | 84 | 85 | 84  |
| ADIGE CM 601 (2)                                               | 72      | 73 | 70  | 68 | 70 | 72 | 71  | 70   | 72 | 74 | 75 | 72  |
| ADIGE CM 601 (3)                                               | 73      | 72 | 71  | 69 | 68 | 70 | 72  | 74   | 76 | 75 | 74 | 73  |
| ME 250                                                         | 82      | 83 | 84  | 81 | 85 | 86 | 82  | 81   | 83 | 84 | 85 | 84  |
| ME 350                                                         | 72      | 74 | 71  | 69 | 70 | 72 | 73  | 76   | 77 | 75 | 74 | 72  |
| OWT 400                                                        | 72      | 73 | 70  | 68 | 70 | 72 | 71  | 70   | 72 | 74 | 75 | 72  |
| GNUTTI 233                                                     | 80      | 82 | 81  | 78 | 83 | 85 | 82  | 81   | 84 | 85 | 86 | 83  |
| GNUTTI 271                                                     | 70      | 72 | 69  | 68 | 69 | 71 | 72  | 70   | 72 | 74 | 75 | 73  |
| GNUTTI 434                                                     | 70      | 72 | 70  | 68 | 71 | 69 | 70  | 72   | 74 | 75 | 73 | 72  |
| TOX Q-S (1)                                                    | 76      | 78 | 78  | 76 | 80 | 81 | 78  | 77   | 79 | 81 | 79 | 83  |
| EMG 6PHR (1)                                                   | 81      | 83 | 82  | 80 | 79 | 82 | 84  | 85   | 83 | 81 | 82 | 81  |
| TOX Q-S (2)                                                    | 80      | 80 | 79  | 78 | 80 | 82 | 81  | 80   | 79 | 81 | 80 | 79  |
| EMG 6PHR (2)                                                   | 79      | 80 | 80  | 82 | 84 | 86 | 83  | 81   | 79 | 77 | 79 | 80  |

Tab. 6.6 Poziom efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń (OEE) dla procesu produkcji korpusów wodomierzy do maja 2024 r.

| Wskaźnik OEE (%) - proces produkcji korpusu wodomierza 2024 r. |         |    |     |    |    |
|----------------------------------------------------------------|---------|----|-----|----|----|
|                                                                | Miesiąc |    |     |    |    |
| Maszyna/urządzenie                                             | I       | II | III | IV | V  |
| ADIGE CM 601 (1)                                               | 83      | 84 | 85  | 85 | 85 |
| ADIGE CM 601 (2)                                               | 73      | 73 | 75  | 76 | 73 |
| ADIGE CM 601 (3)                                               | 74      | 76 | 76  | 75 | 74 |
| ME 250                                                         | 82      | 84 | 85  | 84 | 85 |
| ME 350                                                         | 76      | 77 | 77  | 76 | 74 |
| OWT 400                                                        | 72      | 73 | 75  | 76 | 73 |
| GNUTTI 233                                                     | 81      | 84 | 85  | 84 | 84 |
| GNUTTI 271                                                     | 71      | 72 | 74  | 75 | 74 |
| GNUTTI 434                                                     | 72      | 74 | 75  | 74 | 73 |
| TOX Q-S (1)                                                    | 84      | 81 | 80  | 79 | 83 |
| EMG 6PHR (1)                                                   | 84      | 83 | 82  | 82 | 84 |
| TOX Q-S (2)                                                    | 81      | 80 | 81  | 82 | 82 |
| EMG 6PHR (2)                                                   | 82      | 81 | 82  | 83 | 84 |

Tab. 6.7 Zmiana w p.p. poziomu efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń (OEE) dla procesu produkcji korpusów wodomierzy w miesiącach: I-V 2023 r. w stosunku do I-V 2024 r.

| Wskaźnik OEE – zmiana w p.p. dla poszczególnych maszyn r/r |         |    |     |    |    |
|------------------------------------------------------------|---------|----|-----|----|----|
|                                                            | Miesiąc |    |     |    |    |
| Maszyna/urządzenie                                         | I       | II | III | IV | V  |
| ADIGE CM 601 (1)                                           | +2      | +1 | +3  | +5 | +1 |
| ADIGE CM 601 (2)                                           | +1      | 0  | +5  | +8 | +3 |
| ADIGE CM 601 (3)                                           | +1      | +4 | +5  | +6 | +6 |
| ME 250                                                     | 0       | +1 | +1  | +3 | 0  |
| ME 350                                                     | +4      | +3 | +6  | +7 | +4 |
| OWT 400                                                    | 0       | 0  | +5  | +8 | +3 |
| GNUTTI 233                                                 | +1      | +2 | +4  | +6 | +1 |
| GNUTTI 271                                                 | +1      | 0  | +5  | +7 | +5 |
| GNUTTI 434                                                 | +2      | +2 | +5  | +6 | +2 |
| TOX Q-S (1)                                                | +8      | +3 | +2  | +3 | +3 |
| EMG 6PHR (1)                                               | +3      | 0  | 0   | +2 | +5 |
| TOX Q-S (2)                                                | +1      | 0  | +2  | +4 | +2 |
| EMG 6PHR (2)                                               | +3      | +1 | +2  | +1 | 0  |

Zaprezentowane wyniki dowodzą, iż podjęte działania miały pozytywny wpływ na proces produkcji korpusów wodomierza również w ujęciu jego efektywności. W porównywanym okresie r/r (ostatnie pełne wyniki dostępne były za miesiąc maj 2024 r.) nie odnotowano w żadnym miesiącu, na żadnym stanowisku spadku wskaźnika OEE. Natomiast pozostałe uzyskane wyniki kształtowały się następująco:

- bez zmian dla 10 przypadków to jest 15,38% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 1 p.p. dla 12 przypadków to jest 18,46% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 2 p.p. dla 10 przypadków to jest 15,38% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 3 p.p. dla 10 przypadków to jest 15,38% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 4 p.p. dla 5 przypadków to jest 7,69% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 5 p.p. dla 8 przypadków to jest 12,31% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 6 p.p. dla 5 przypadków to jest 7,69% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 7 p.p. dla 2 przypadków to jest 3,08% ogólnej liczby wskazań,
- zmiana o 8 p.p. dla 3 przypadków to jest 4,63% ogólnej liczby wskazań.

Szczegółowa analiza wartości wskaźnika OEE dla poszczególnych stanowisk produkcyjnych w miesiącach I-V 2024 r. wskazuje tendencję rosnącą w stosunku do analogicznych miesięcy roku poprzedniego, chociaż nie jest ona zawsze powtarzalna. Przyczyną tego jest wprowadzanie w sterowaniu procesem produkcji dużej ilości zmian, które muszą zostać ustabilizowane i trwale utrzymane. Zmiana wartości wskaźnika OEE w zakresie 1-4 p.p. dotyczyła 56,91% ogólnej liczby wskazań, natomiast w zakresie 5-8 p.p. dotyczyła 27,71% ogólnej liczby wskazań. Taki rozkład wyników wskazuje, że w większości przypadków procesy produkcyjne podlegały drobnym usprawnieniom lub korektom. Większe zmiany, chociaż mniej liczne, wskazują na bardziej znaczące interwencje lub zmiany w procesach produkcyjnych, które miały silniejszy wpływ na efektywność operacyjną.

## 7. PODSUMOWANIE UZYSKANYCH WYNIKÓW I PLAN DALSZYCH DZIAŁAŃ

### 7.1. Wnioski dotyczące tez pracy, problemów badawczych

Tezą pracy, było sformułowane stwierdzenie, iż „*Adaptacyjne sterowanie procesem produkcji zwiększa efektywność procesu produkcji oraz poziom jakości produkowanych wyrobów*”. W pracy przedstawiono autorską metodykę (Rys. 4.9), służącą realizacji obranej strategii oraz wyznaczeniu celów w oparciu o ustanowione na jej podstawie wskaźniki KPI: LT (Lead Time – Tab. 4.3), SC (Scrap ratio – Tab. 4.4), OEE (Overall equipment effectiveness – Tab. 4.5). Zbudowano model hierarchicznej struktury wskaźników (Rys. 4.10) odzwierciedlający zastosowanie wskaźników KPI na poszczególnych poziomach zarządzania, tj. strategicznym, taktycznym, operacyjnym. Dobrano metody wspomagania decyzji, które oprogramowane, zaimplementowano w zbudowanym prototypowym, zintegrowanym systemie do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji (rozdział 5.2). Wdrożono oraz poddano walidacji cały zbudowany system na wybranym, złożonym procesie produkcji korpusów wodomierza w przedsiębiorstwie Fabryka Armatur Swarzędz sp. z o.o. Jednoznacznie potwierdzono poprawność założeń dla systemu oraz skuteczności jego działania, dzięki uzyskanemu skróceniu czasu przejścia materiału w procesie (obniżenie wskaźnika LT), redukcji poziomu sztuk brakowych (obniżenie wskaźnika SC) oraz poprawie ogólnej efektywności wyposażenia (wzrost wskaźnika OEE), tym samym dostarczając argumentów za poprawnym postawieniem tezy.

W celu rozstrzygnięcia postawionych problemów badawczych, jakie wyszczególniono w niniejszej pracy doktorskiej, przyjęto i rozpatrzono metodyczne i wieloaspektowe podejście, które pozwoliło na wszechstronną analizę procesu produkcyjnego w kontekście adaptacyjnego sterowania tym procesem. Rozwiązanie każdego z problemów badawczych wymagało nie tylko dogłębnej analizy teoretycznej, ale również ich empirycznej weryfikacji w warunkach rzeczywistej produkcji. W związku z tym określono zależności pomiędzy różnymi elementami procesu produkcyjnego oraz określono ich wpływ na realizację celów strategicznych, a także dobrano odpowiednie narzędzia i metody sterowania, które efektywnie zintegrowano w ramach złożonego systemu produkcyjnego korpusów wodomierza.

Analiza bieżącego stanu procesu produkcyjnego, wykazała potrzebę skoncentrowania się na następujących aspektach (rozdział 4):

- stosowanej technologii,
- przepływie informacji w procesie,
- podejmowaniu decyzji w procesie,
- identyfikacji barier oraz ograniczeń w implementacji technologii cyfrowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań przedstawiono stan początkowy procesu, wskazano jego słabe punkty oraz wytypowano jego obszary, w których istnieją rezerwy do poprawy. Dzięki wykonanej analizie udowodniono, że efektywność i jakość procesu produkcyjnego w dużej mierze zależy od spójności tych aspektów ze stosowaną w przedsiębiorstwie strategią zarządzania i sterowania procesem produkcyjnym. Równocześnie przeprowadzono badanie i wskazanie potencjalnych wyzwań i zagrożeń dla procesu wdrażania

w przedsiębiorstwach elementów technologii cyfrowych. Pozwoliło to na ich wcześniejsze rozpoznanie, co w zdecydowany sposób ograniczyło ich negatywny wpływ na zrealizowaną implementację zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania produkcją w FAS.

Skoncentrowanie się na kolejnym problemie badawczym wymagało wyodrębnienia tych obszarów procesu produkcyjnego, które mają największy wpływ na realizację celów strategicznych przedsiębiorstwa. Wykorzystanie autorskiej metodyki, przedstawionej na rys. 4.9 - Schemat postępowania – etapy wdrażania systemu opartego na wskaźnikach KPI, umożliwiło precyzyjne wyznaczenie wskaźników KPI, służących do oceny stanu procesu produkcyjnego w wytypowanych kluczowych obszarach. W związku z tym wytypowano konkretne wskaźniki KPI oraz zaprojektowano model zarządzania nimi, co posłużyło do walidacji skuteczności działania całego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, ale także było odpowiedzią na potrzeby wynikające z opracowanej strategii zarządzania i ustanowionych celów dla badanego przedsiębiorstwa.

W odpowiedzi na następny wyszczególniony w pracy doktorskiej problem badawczy, przeprowadzono analizę dotyczącą doboru metod sterowania procesem produkcji i jakością wyrobów, gdzie wybrano i wykorzystano metody heurystyczne oraz wielokryterialne metody wspomagania decyzji. Dopasowano metody do stosowanej technologii obejmującej różnorodne techniki wytwarzania uwzględniając specyfikę poszczególnych operacji technologicznych. Zastosowano metody heurystyczne, gdyż w procesach decyzyjnych oferowały one elastyczne i pragmatyczne podejście do rozwiązywania złożonych problemów, które byłyby trudne do rozwiązania przy użyciu tradycyjnych metod matematycznych. Z kolei zastosowanie wielokryterialnych metody wspomagania decyzji umożliwiło natomiast systematyczne analizowanie i porównywanie różnych opcji wyboru w kontekście wielu, często sprzecznych kryteriów. Przeprowadzenie wieloaspektowej analizy procesu produkcji korpusu wodomierza oraz samego wyrobu, potwierdziło zasadność zastosowania w/w metod w kontekście podejmowania bardziej skutecznych decyzji zarządczych wpływających na efektywność procesu i jakość wyrobu.

System adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza w FAS oparto na monitorowaniu, pobieraniu, przetwarzaniu, analizowaniu oraz wizualizacji pozyskanych parametrów i informacji procesowych oraz charakterystyk krytycznych wyrobu. Było to rezultatem prac nad problemem badawczym dotyczącym określenia metod formalnego sposobu zapisu wiedzy. Wykorzystano technologie cyfrowe służące gromadzeniu danych i informacji (m.in. zainstalowano czujniki w maszynach i urządzeniach czy panele operatorskie w hali produkcji), oprogramowano model decyzyjny (m.in. opracowano od podstaw system ekspercki) i przeprowadzono integrację systemów informatycznych posiadanych w FAS (m.in. MES i ERP), a także znacząco rozbudowano samą infrastrukturę informatyczną (m.in. sieć przesyłowa, serwery, routery, AP). W ten sposób uzyskano możliwość śledzenia on-line przebiegu procesu oraz natychmiastowego podejmowania działania w odpowiedzi na pojawiające się zakłócenia i sytuacje niepożądane z wykorzystaniem odpowiedzi i wskazania konkretnego sposobu reagowania dzięki oprogramowanym algorytmom decyzyjnym.

Pozyskiwane surowe jak i przetworzone dane oraz informacje produkcyjne wykorzystano do zaprojektowania dashboardów, gdzie w przejrzysty sposób umożliwiono ich indywidualną

prezentację w zależności od preferencji i wymagań dedykowanego użytkownika. Dzięki temu zdecydowanie ułatwiono dostęp do danych, a przyjęta forma graficzna sprawiła, że są one bardziej czytelne i zrozumiałe. Usprawniło to wewnętrzne kanały komunikacji czyniąc proces podejmowania decyzji bardziej sprawnym i przejrzystym. Dotyczy to także wdrożonych wskaźników KPI, których bieżący monitoring i szeroka wizualizacja pozwoliła w przystępny sposób sygnalizować aktualny stan procesu produkcji. Miało to zdecydowanie pozytywny wpływ na realizację całej strategii przedsiębiorstwa i wyznaczonych celów, gdyż wszyscy pracownicy poprzez swobodny dostęp do danych i informacji i ich codzienne śledzenie, czuli się odpowiedzialni za uzyskiwane wyniki i zaangażowani w proces korekcyjny, jeżeli pojawiały się odstępstwa od wyznaczonych parametrów. W sposób modelowy działało w ten sposób sprzężenie zwrotne, diametralnie odmieniając zasady komunikacji, przepływu danych i informacji oraz jakości podejmowanych decyzji w procesie produkcji korpusu wodomierza z niskiego poziomu przed rozpoczęciem wdrożenia (rys. 4.14) do akceptowalnego stanu docelowego (rys. 4.15).

## **7.2. Wnioski poznawcze**

Celem pracy doktorskiej było zaprojektowanie koncepcji, a następnie wdrożenie zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji wykorzystującym technologie cyfrowe. Przeprowadzone badania predestynują autora pracy do sformułowania następujących wniosków poznawczych:

1. Oparcie procesu sterowania procesem produkcji wykorzystującym różnorodne techniki wytwarzania o technologie cyfrowe, wspomagające adaptacyjne sterowanie tym procesem, zapewnia efektywny przepływ informacji pomiędzy rozproszonymi elementami systemu.
2. Opracowana metodyka wychodzi naprzeciw specyficznym problemom, jakie należy przeanalizować i przezwyciężyć w dowolnym przedsiębiorstwie, chcącym podnieść efektywność swojego procesu produkcji i jakość wyrobów z wykorzystaniem adaptacyjnego sterowania procesem produkcji.
3. Wykorzystane elementy metody Hoshin Kanri, wraz z zaprojektowaną hierarchiczną strukturą wskaźników umożliwiają wyznaczenie strategii i celów dla przedsiębiorstwa oraz wybór, wdrożenie i utrzymanie systemu wskaźników KPI.
4. Opracowane mechanizmy i algorytmy pozwalają na zaprojektowanie cyfrowej repliki procesu produkcyjnego, bazującej na danych pozyskanych z procesu w czasie rzeczywistym.

## **7.3. Wnioski użyteczne i wdrożeniowe**

Przeprowadzone wdrożenie potwierdziło skuteczność zastosowanego zbioru zasad i reguł umożliwiających na adaptacyjne sterowanie produkcją oraz zbioru narzędzi i metod do oceny stanu procesu i jakości wyrobu. Wszystko to wykonano jako element innowacji cyfrowej, integrującej różne rozwiązania dotyczące oceny stanu procesu i wyrobu, z uwzględnieniem stosowanych w procesie produkcji różnych technik wytwarzania, co pozwoliło sformułować następujące wnioski:

1. Sterowanie adaptacyjne złożonymi systemami produkcyjnymi jest procesem wymagającym podejmowania właściwych decyzji na podstawie wiarygodnych i użytecznych informacji.
2. Poprawa efektywności procesu produkcyjnego jest możliwa dzięki jego szczegółowemu monitoringowi w odniesieniu do parametrów procesowych i powiązanych z nimi charakterystyk krytycznych wyrobu oraz opracowaniu jasnych wytycznych, co do rodzaju podejmowanych działań w następnie występujących problemach produkcyjnych.
3. Wprowadzenie systemu w przedsiębiorstwie wymaga opracowania strategii dla przedsiębiorstwa, ustanowienia celów i wskaźników służących jego walidacji.
4. Kompleksowe wdrożenie zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusów wodomierza w przedsiębiorstwie umożliwiło:
  - skrócenie czasu przejścia materiału w procesie o 43%,
  - spadek średniomiesięcznej wartości wskaźnika braków o 0,41%,
  - w najgorszym przypadku utrzymanie wskaźnika ogólnej efektywności wyposażenia na niezmiennym poziomie, a w najlepszym jego wzrost o 8 punktów procentowych.
5. Proces rozbudowy infrastruktury linii produkcyjnej o elementy umożliwiające jej cyfryzację jest zadaniem wymagającym dobrego zaplanowania potrzeb użytkowników oraz zapewnienia spełnienia ich założeń i oczekiwań.
6. Zastosowanie systemu opartego na technologii cyfrowej wymaga doboru odpowiedniej klasy sprzętu i urządzeń, kompatybilnych z posiadaną infrastrukturą przedsiębiorstwa, ale też spełniających określone warunki dotyczące, m.in. cyberbezpieczeństwa oraz potrafiących sprostać technicznym aspektom budowanego systemu, np. szybkość transferu danych, czy przeprowadzanej analizy.

#### **7.4. Wnioski dotyczące dalszych badań**

Opracowana metodyka dotycząca zintegrowanego adaptacyjnego systemu wspomagania zarządzania i doskonalenia procesów posiada otwartą strukturę, co pozwala na jej modyfikację i dalszy rozwój. Metody zaproponowane i przedstawione w dysertacji doktorskiej mają potencjał do dalszego doskonalenia oraz rozbudowy i powinny być dalej rozwijane.

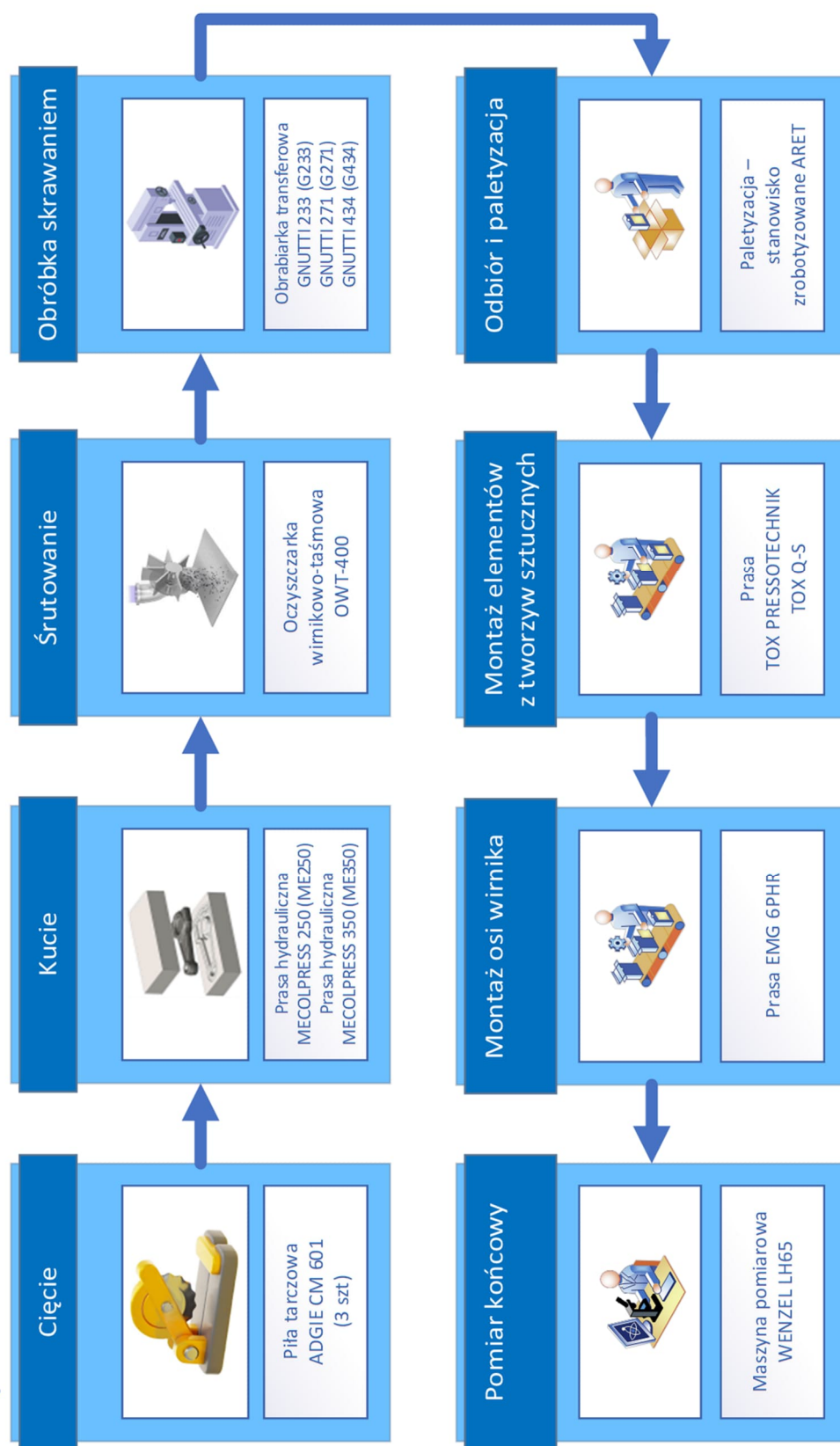
W przedsiębiorstwie FAS celem jest dostosowanie możliwości systemu do obsługi kolejnych procesów technologicznych i rodzin wyrobów, charakteryzujących się zmieniającymi danymi wejściowymi i oczekiwaniami wyjściowymi. W takim przypadku zaproponowane w pracy rozwiązanie podlegać będzie dalszym modyfikacjom, korzystając natomiast z solidnie zbudowanych i sprawnie działających fundamentów systemu. W następnej kolejności rozbudowa systemu powinna dążyć do wzbogacenia zaimplementowanego modelu decyzyjnego o analizę kolejnych zestawów problemów produkcyjnych, rozszerzonych o odpowiadającą im gamę proponowanych rozwiązań, co przyczyni się do dalszego wzrostu skuteczności zawartych w nim metod wspomagania decyzji. Co więcej, warte rozważenia jest dalsza integracja adaptacyjnego systemu do sterowania procesem produkcji z pozostałymi

systemami wykorzystywanymi w przedsiębiorstwie, w szczególności dotyczącymi wykorzystania czasu pracy pracowników i przydzielania im kolejnych zadań produkcyjnych.

Spośród proponowanych innych kierunków dalszych badań można wymienić następujące:

1. Wprowadzenie bardziej zaawansowanych mechanizmów i algorytmów, w tym uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji, które będą w stanie nie tylko dostosowywać proces produkcji do bieżących warunków na podstawie danych pozyskanych z procesu w czasie rzeczywistym, ale także prognozować przyszłe scenariusze produkcyjne i sugerować działania prewencyjne jak, np. w przypadku preskryptywnego utrzymania ruchu.
2. Implementacja zaawansowanych narzędzi do zarządzania zużyciem energii, pozwalających na optymalizację procesów produkcyjnych pod kątem minimalizacji kosztów operacyjnych oraz emisji CO<sub>2</sub>, co wpisuje się w wymagania zrównoważonego rozwoju.
3. Pełna integracja z technologiami mobilnymi, które umożliwią monitorowanie i sterowanie procesem produkcyjnym zdalnie za pomocą urządzeń przenośnych, co zwiększy elastyczność i szybkość reakcji na zmiany w procesie.

## ZAŁĄCZNIKI



Rys. Z.1. Przebieg procesu technologicznego produkcji korpusu wodomierza z wyszczególnieniem maszyn i urządzeń produkcyjnych

Tab. Z.2. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część I

| Obszar: Efektywność/Organizacja |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                | RASCI                                                                                                                                                                                                     |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|--|
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                | Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji                                                                                                                   |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                | R odpowiedzialny za realizację celu<br>A zatwierdzający plan, budżet, realizację celu<br>S wspierający realizację lub wykonawca<br>C należy z nim skonsultować<br>I ma zostać poinformowany wykonawca/-cy |   |   |   |   | S konkretny<br>M mierzalny<br>A osiągalny<br>R realistyczny<br>T ograniczony w czasie<br>E zweryfikowany<br>R zapisany |   |   |   |   |   |   |  |
| KONTEKST                        |                                           | Maksymalne wykorzystanie zasobów (maszyn, ludzi, materiału). Wykonujemy to co jest potrzebne w odpowiedniej ilości, jakości i w zaplanowanym czasie.<br>Organizacja procesu produkcji dająca możliwość realizacji zamówień w odpowiedniej ilości, wyznaczonym terminie, przy założonym poziomie jakości i w budżecie kosztowym. |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                                                                                                                                  |   |   |   |   | WERYFIKACJA                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |  |
| L p                             | Cel                                       | Kluczowe działania /lub etapy w realizacji celu/                                                                                                                                                                                                                                                                                | Wymagania ilościowo-jakościowe; określ stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel                                                                                              | Wskaźnik wykonania celu /rodzaj/                                                                                                                              | Poziom wskaźnika   | Miara wskaźnika | Wskaźnik wykonania celu termin | R                                                                                                                                                                                                         | A | S | C | I | S                                                                                                                      | M | A | R | T | E | R |  |
| 1                               | Poprawa efektywności przepływu materiałów |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                       | LT - Lead Time - wskaźnik czasu przejścia materiału w procesie (czas od dostawy materiału wejściowego do magazynu do dostarczenia wyrobu gotowego do klienta) | Redukcja o 15% rdr | h               | 31.12.2024                     |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           | Określenie, które procesy/linie/maszyny mierzymy z perspektywy efektywności przepływu                                                                                                                                                                                                                                           | Przeprowadzenie szczegółowej analizy istniejących procesów produkcyjnych, linii produkcyjnych, maszyn i urządzeń, aby zidentyfikować istotne punkty przepływu materiałów.                                             |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Podział procesów na kategorie według ich wpływu na przepływ materiałów, np. transport, magazynowanie, obróbka, itp.                                                                                                   |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           | Wykonanie VSM dla kluczowego procesu w firmie                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Identyfikacja kluczowego procesu, który ma największy wpływ na efektywność przepływu materiałów i generuje największe marnotrawstwo.                                                                                  |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Analiza danych historycznych, aby wybrać proces o najwyższym potencjale do usprawnienia.                                                                                                                              |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Przeprowadzenie obserwacji i zbieranie danych na temat aktualnego stanu procesu, w tym, m.in. czasu cyklu, poziomu zapasów w trakcie produkcji i wydajności maszyn i urządzeń.                                        |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Przeprowadzenie analizy przyczynowo-skutkowej w celu zidentyfikowania przyczyn wąskich gardeł w przepływie materiałów.                                                                                                |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Sporządzenie szczegółowej mapy aktualnego stanu strumienia wartości, identyfikując wszystkie kroki w procesie, zarówno dodające, jak i niedodające wartości.                                                          |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Opracowanie wskaźnika (KPI) dla kluczowego procesu, który będzie punktem odniesienia przy sporządzaniu kolejnych map VSM                                                                                              |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           | Wprowadzenie standardów i usprawnienia zarządzania przepływem materiałów oraz zapasami                                                                                                                                                                                                                                          | Przeprowadzenie analizy przyczynowo-skutkowej dla zidentyfikowanych problemów, aby zrozumieć ich źródła i wpływ na efektywność procesu, w tym eliminację wąskich gardeł.                                              |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Analiza dotychczasowych danych operacyjnych dotyczących poziomów zapasów, czasu realizacji zamówień, oraz wskaźników wydajności przepływu materiałów.                                                                 |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Ustalenie odpowiednich poziomów zapasów dla różnych kategorii materiałów, aby zminimalizować nadmiar i zapewnić dostępność krytycznych zasobów.                                                                       |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Wdrożenie systemu monitorowania ustanowionego wskaźnika (KPI)                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Przeszkolenie pracowników nadzoru produkcji w zakresie nowych procedur zarządzania zapasami, w tym wykonywania VSM                                                                                                    |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Opracowanie procedur dokumentowania wyników kontroli monitorowania strumienia wartości. Regularne audyty wewnętrzne w celu oceny zgodności z nowymi standardami i procedurami oraz identyfikacji obszarów do poprawy. |                                                                                                                                                               |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |

Tab. Z.3. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część II

| Obszar: Efektywność/Organizacja                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                | RASCI                                                                                   |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony              |   |   |   |   |   |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|--------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| KONTEKST                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                | Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji |   |   |   |   | R<br>A<br>S<br>C<br>I<br><br>S<br>M<br>A<br>R<br>T<br>E<br>R |   |   |   |   |   |   |
| Maksymalne wykorzystanie zasobów (maszyn, ludzi, materiału). Wykonujemy to co jest potrzebne w odpowiedniej ilości, jakości i w zaplanowanym czasie. Organizacja procesu produkcji dająca możliwość realizacji zamówień w odpowiedniej ilości, wyznaczonym terminie, przy założonym poziomie jakości i w budżecie kosztowym. |                                |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                | R<br>A<br>S<br>C<br>I<br><br>S<br>M<br>A<br>R<br>T<br>E<br>R                            |   |   |   |   | S<br>M<br>A<br>R<br>T<br>E<br>R                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                |   |   |   |   | WERYFIKACJA                                                  |   |   |   |   |   |   |
| L<br>p                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Cel                            | Kluczowe działania /lub etapy w realizacji celu/                                                 | Wymagania ilościowo-jakościowe; określi stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel                                                                                                                                  | Wskaźnik wykonania celu /rodzaj/                                                                         | Poziom wskaźnika | Miara wskaźnika | Wskaźnik wykonania celu termin | R                                                                                       | A | S | C | I | S                                                            | M | A | R | T | E | R |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Zwiększenie dostępności maszyn |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                            | OEE - Overall Equipment Effectiveness – Ogólna Efektywność Wyposażenia (Dostępność * Wydajność * Jakość) | Wzrost o 1% rdr  | %               | 31.12.2024                     |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                | Stworzenie bazy powtarzających awarii i usterek (jak często występują, jakich stanowisk dotyczy) | Zbieranie danych: dokumentowanie wszystkich awarii i usterek maszyn w formie szczegółowych raportów. Zapisywanie częstotliwości występowania awarii, w tym daty, czasu trwania i dotkniętych stanowisk.                                                    |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Kategoryzacja awarii: grupowanie awarii według ich przyczyn (mechaniczne, elektryczne, programowe, itp.) oraz według maszyn i stanowisk, których dotyczą.                                                                                                  |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Ustalanie priorytetów dla najczęściej występujących problemów, które mają największy wpływ na przestoje produkcyjne. Wykorzystanie analizy Pareto.                                                                                                         |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                | Sparametryzowanie czynników dostępności maszyn                                                   | Stworzenie listy wszystkich czynników wpływających na dostępność maszyn, takich jak awarie, konserwacje, przebrojenia, dostępność części zamiennych, umiejętności operatorów, itp.                                                                         |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Przeprowadzenie analizy historycznych danych dotyczących przestojów maszyn w celu zidentyfikowania najczęstszych i najbardziej krytycznych czynników.                                                                                                      |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Określenie odpowiedniego KPI. Wyznaczenie wartości referencyjnych i progów alarmowych, które będą pomocne w monitorowaniu dostępności maszyn.                                                                                                              |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                | Wprowadzenie systemu poprawy dostępności                                                         | Analiza danych historycznych dotyczących awarii, konserwacji i przestojów w celu zrozumienia trendów i wzorców.                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Zainstalowanie czujników i wdrożenie systemów monitorujących, które będą zbierały dane w czasie rzeczywistym na temat parametrów operacyjnych maszyn. Integracja z istniejącymi systemami ERP i MES w celu gromadzenia danych o dostępności maszyn.        |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Ustanowienie systemu ciągłego monitorowania kluczowych parametrów dostępności maszyn w czasie rzeczywistym. Regularna analiza trendów w zebranych danych w celu wykrywania anomalii i potencjalnych problemów zanim staną się krytyczne.                   |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Tworzenie interaktywnych dashboardów i raportów, które wizualizują dane dotyczące dostępności maszyn, pozwalając na szybkie i efektywne podejmowanie decyzji. Ustawienie automatycznych alertów i powiadomień w przypadku przekroczenia progów alarmowych. |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Opracowanie i wdrożenie standardowych procedur operacyjnych i konserwacyjnych dla wszystkich maszyn.                                                                                                                                                       |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  | Stworzenie mechanizmów informacji zwrotnej od operatorów i techników, umożliwiających wprowadzanie ulepszeń w systemach monitorowania i zarządzania.                                                                                                       |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                              |   |   |   |   |   |   |

Tab. Z.4. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część III

| Obszar: Efektywność/Organizacja                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                          |                  |                 |                                | RASCI                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| KONTEKST                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                          |                  |                 |                                | Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji                                                                                                                                  |   |   |   |   | R<br>A<br>S<br>C<br>I<br><br>S<br>M<br>A<br>R<br>T<br>E<br>R                                                                                |   |   |   |   |   |   |
| Maksymalne wykorzystanie zasobów (maszyn, ludzi, materiału). Wykonujemy to co jest potrzebne w odpowiedniej ilości, jakości i w zaplanowanym czasie. Organizacja procesu produkcji dająca możliwość realizacji zamówień w odpowiedniej ilości, wyznaczonym terminie, przy założonym poziomie jakości i w budżecie kosztowym. |                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                          |                  |                 |                                | R<br>odpowiedzialny za realizację celu<br>A<br>zatwierdzający plan, budżet, realizację celu<br>S<br>wspierający realizację lub wykonawca<br>C<br>należy z nim skonsultować<br>I<br>ma zostać poinformowany wykonawca/-cy |   |   |   |   | S<br>konkretny<br>M<br>mierzalny<br>A<br>osiągalny<br>R<br>realistyczny<br>T<br>ograniczony w czasie<br>E<br>zweryfikowany<br>R<br>zapisany |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                          |                  |                 |                                | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                                                                                                                                                 |   |   |   |   | WERYFIKACJA                                                                                                                                 |   |   |   |   |   |   |
| L<br>p                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Cel                                 | Kluczowe działania /lub etapy w realizacji celu/                                                         | Wymagania ilościowo-jakościowe; określ stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel                                                                                                                                                                                                     | Wskaźnik wykonania celu /rodzaj/                                                                         | Poziom wskaźnika | Miara wskaźnika | Wskaźnik wykonania celu termin | R                                                                                                                                                                                                                        | A | S | C | I | S                                                                                                                                           | M | A | R | T | E | R |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Wzrost wydajności maszyn i urządzeń |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | OEE - Overall Equipment Effectiveness – Ogólna Efektywność Wyposażenia (Dostępność * Wydajność * Jakość) | Wzrost o 1% rdr  | %               | 31.12.2024                     |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     | Określenie przyczyn spadku wydajności maszyn i urządzeń (jak często występują, jakich stanowisk dotyczy) | Przeprowadzenie przeglądu historii awarii, w tym dokumentacja przyczyn, czasów przestoju i wpływu na produkcję. Przeprowadzenie wywiadów z operatorami, technikami i innymi pracownikami bezpośrednio zaangażowanymi w obsługę maszyn w celu uzyskania informacji o zauważonych problemach i spadkach wydajności.            |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Analiza zgromadzonych danych w celu identyfikacji wzorców i trendów spadków wydajności, takich jak częstotliwość awarii, typy problemów i konkretne maszyny lub linie produkcyjne, które są najczęściej dotknięte.                                                                                                           |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     | Sparametryzowanie czynników wydajności                                                                   | Przeprowadzenie szczegółowej analizy procesów produkcyjnych w celu zidentyfikowania kluczowych czynników wpływających na wydajność maszyn i urządzeń. W szczególności, obejmujących: czas cyklu, czas przestoju, czas konserwacji .                                                                                          |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Opracowanie wskaźnika KPI, który umożliwi holistyczne ocenienie efektywności maszyn i identyfikację strat w każdym z tych obszarów. Wyznaczenie wartości referencyjnych i progów alarmowych, które będą pomocne w monitorowaniu wydajności maszyn i urządzeń.                                                                |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     | Wprowadzenie systemu poprawy wydajności                                                                  | Wykorzystanie narzędzi analitycznych do analizy danych historycznych w celu identyfikacji długoterminowych trendów, wzorców awarii oraz okresowych spadków wydajności. Ustanowienie systemu archiwizacji danych historycznych, który umożliwi bezpieczne przechowywanie oraz łatwy dostęp do danych z różnych okresów czasu. |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Zainstalowanie czujników i wdrożenie systemów monitorujących, które będą zbierały dane w czasie rzeczywistym na temat parametrów operacyjnych maszyn. Integracja z istniejącymi systemami ERP i MES w celu gromadzenia danych o dostępności maszyn.                                                                          |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Wybór i wdrożenie narzędzi do monitorowania wydajności maszyn, takich jak systemy SCADA, MES lub zaawansowane oprogramowanie analityczne. Integracja tych narzędzi z istniejącymi systemami IT w firmie.                                                                                                                     |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Konfiguracja systemów monitorujących w celu gromadzenia danych z maszyn, w tym ustawienie parametrów monitorowania, powiadomień o awariach i generowania raportów.                                                                                                                                                           |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Implementacja systemów, które umożliwiają zbieranie danych w czasie rzeczywistym.                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          | Opracowanie procedur operacyjnych dotyczących monitorowania danych, interpretacji wyników oraz reagowania na alerty i problemy identyfikowane przez system.                                                                                                                                                                  |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                          |                  |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                          |   |   |   |   |                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |

Tab. Z.5. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część IV

| Obszar: Efektywność/Organizacja |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                | RASCI                                                                                   |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| KONTEKST                        |                                                                                                                                                            | Maksymalne wykorzystanie zasobów (maszyn, ludzi, materiału). Wykonujemy to co jest potrzebne w odpowiedniej ilości, jakości i w zaplanowanym czasie.<br>Organizacja procesu produkcji dająca możliwość realizacji zamówień w odpowiedniej ilości, wyznaczonym terminie, przy założonym poziomie jakości i w budżecie kosztowym. |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                | Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji |   |   |   |   | S<br>M<br>A<br>R<br>T<br>E<br>R                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                |   |   |   |   | WERYFIKACJA                                     |   |   |   |   |   |   |
| L<br>p                          | Cel                                                                                                                                                        | Kluczowe działania /lub etapy w realizacji celu/                                                                                                                                                                                                                                                                                | Wymagania ilościowo-jakościowe; określ stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel | Wskaźnik wykonania celu /rodzaj/                                                                                                                      | Poziom wskaźnika   | Miara wskaźnika | Wskaźnik wykonania celu termin | R                                                                                       | A | S | C | I | S                                               | M | A | R | T | E | R |
| 4                               | Redukcja czasu kadry zarządzającej na działania reaktywne                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                          | RT - Reactive Time - Czas Reaktywny (stosunek różnicy między czasem reaktywnym przed i po wdrożeniu usprawnień do czasu reaktywnego przed wdrożeniem) | Redukcja o 15% rdr | %               | 31.12.2024                     |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 | Praca nad szczegółową analizą procesów i procedur w celu identyfikacji obszarów, które generują najwięcej problemów wymagających interwencji zarządzającej | Dokonanie przeglądu procedur operacyjnych i zarządczych w celu oceny ich skuteczności oraz identyfikacji luk, które mogą prowadzić do problemów. Ocena, czy procedury są wystarczająco szczegółowe i czy są dostosowane do bieżących potrzeb organizacji.                                                                       |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Analiza przypadków problematycznych w celu ustalenia, jakie procedury są nieefektywne lub przestarzałe i jakie zmiany są potrzebne. Dokumentowanie wyników analizy i opracowywanie planów działania w celu ich rozwiązania.                                                                                                     |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 | Wykonanie mapy procesów, które ilustrują kluczowe obszary odpowiedzialne za powstawanie problemów (awarie, braki, spadki wydajności)                       | Zidentyfikowanie wszystkich kluczowych procesów w organizacji, które mają wpływ na produkcję, jakość oraz wydajność. Analiza zarówno procesów podstawowych, jak i wspierających.                                                                                                                                                |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Zebranie danych dotyczących awarii, braków oraz spadków wydajności z różnych źródeł, takich jak raporty wewnętrzne, dane z systemu ERP oraz informacje otrzymane z innych działów. Analiza danych w celu określenia częstotliwości występowania i powagi problemów.                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Stworzenie szczegółowych schematów (map) dla każdego z kluczowych procesów, przedstawiających przepływ pracy, interakcje między działami, oraz krytyczne punkty kontrolne, gdzie mogą występować problemy.                                                                                                                      |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 | Opracowanie i wdrożenie skutecznych kanałów komunikacji (diagnoza przepływu informacji w trakcie realizacji procesu produkcji)                             | Przeprowadzenie szczegółowej analizy istniejących kanałów komunikacji w ramach procesu produkcji. Identyfikacja luk i nieefektywności w obecnych metodach przekazywania informacji.                                                                                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Ustalenie standardów dotyczących częstotliwości, formy oraz treści komunikacji. Wprowadzenie jednolitych procedur raportowania i informowania o problemach oraz sukcesach w produkcji.                                                                                                                                          |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Selekcja i dostosowanie narzędzi komunikacyjnych i zarządzających danymi.                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Określenie wymagań funkcjonalnych dla nowego systemu, w tym potrzebnych integracji, sposobów prezentacji danych oraz mechanizmów powiadamiania i raportowania.                                                                                                                                                                  |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Wdrożenie wybranych narzędzi i rozwiązań komunikacyjnych w środowisku produkcyjnym. Zapewnienie, że nowe systemy są w pełni zintegrowane z istniejącymi technologiami i procesami.                                                                                                                                              |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |
|                                 |                                                                                                                                                            | Przeprowadzenie szkoleń dla pracowników dotyczących korzystania z nowych kanałów komunikacji. Zapewnienie, że personel rozumie, jak efektywnie korzystać z nowych narzędzi oraz jak przestrzegać ustalonych standardów komunikacji.                                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                         |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |

Tab. Z.6. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część I

| Obszar: Jakość                                                                                                                                                                                                    |                                                   |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         | RASCI                                                                                        |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony |   |   |   |   |   |   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|-------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|--|
| KONTEKST                                                                                                                                                                                                          |                                                   |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         | Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji celu |   |   |   |   | S<br>M<br>A<br>R<br>T<br>E<br>R                 |   |   |   |   |   |   |  |
| Dążenie do wykonania pracy dobrze za pierwszym razem (zgodnie z założeniem).<br>Jakość rozumiana również jako redukcja zmienności parametrów procesowych będzie wspierała wzrost wydajności i dostępności maszyn. |                                                   |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                     |   |   |   |   | WERYFIKACJA                                     |   |   |   |   |   |   |  |
| L<br>p                                                                                                                                                                                                            | Cel                                               | Kluczowe działania<br>/lub etapy w realizacji celu/                                                                                                                             | Wymagania ilościowo-jakościowe; określ stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel                                                                                                                                                                                                                                            | Wskaźnik wykonania celu<br>/rodzaj/                                                                                                                                                                  | Poziom<br>wskaźnika | Miara<br>wskaźnika | Wskaźnik<br>wykonania<br>celu<br>termin | R                                                                                            | A | S | C | I | S                                               | M | A | R | T | E | R |  |
| 1                                                                                                                                                                                                                 | Redukcja kosztów - wyroby nieodpowiedniej jakości |                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | COPQ - Cost of Poor Quality - wskaźnik Kosztów Wyrobów Nieodpowiedniej Jakości (stosunek całkowitych kosztów związanych z wyrobami nieodpowiedniej jakości do całkowitych kosztów produkcji)         | Redukcja o 10% rdr  | %                  | 31.12.2024                              |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   | Sparametryzowanie kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów (czas postoju, re-work, narzędzia)                                                                                    | Analiza stanu obecnego - przeprowadzenie szczegółowej analizy obecnych kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów, w tym identyfikacja wszystkich źródeł kosztów, takich jak przestoje, naprawy, wymiany narzędzi, nadgodziny                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Opracowanie systemu klasyfikacji kosztów z uwzględnieniem różnych kategorii kosztów związanych z nieodpowiednią jakością wyrobów, takich jak koszty bezpośrednie (np. naprawy, wymiany) i pośrednie (np. przestoje, dodatkowa kontrola jakości)                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Dane muszą być zbierane z dokładnością do 5 min dla pomiarów czasu przestoju                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Zaprowadzenie statystyki zużycia kluczowych narzędzi. Narzędzia kuźnicze - ilość wykonanych cykli, narzędzia do obróbki skrawaniem - statystyka ilościowa w okresie 1 miesiąca                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Zaprowadzenie statystyki godzin przeznaczonych na re-work w cyklu miesięcznym                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   | Sprawdzenie kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów za 2022 i 2023 rok                                                                                                          | Przeprowadzenie szczegółowej analizy kosztów związanych z nieodpowiednią jakością wyrobów, obejmującej: czas przestoju, zużycie narzędzi, dodatkowe koszty napraw oraz same wyroby                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Gromadzenie i Organizacja Danych za 2022 i 2023 rok - zebranie wszystkich dostępnych danych dotyczących kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów za lata 2022 i 2023 z różnych źródeł, takich jak raporty produkcyjne, dane z systemu ERP, audyty jakościowe i inne dokumenty.                                                                                       |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Przeprowadzenie dokładnej weryfikacji zebranych danych w celu zapewnienia ich poprawności i spójności. Weryfikacja powinna obejmować porównanie danych z różnych źródeł oraz weryfikację zapisów finansowych                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Analiza danych - Przeprowadzenie szczegółowej analizy danych w celu identyfikacji głównych źródeł kosztów nieodpowiedniej jakości. Analiza powinna obejmować: koszty przestoju maszyn i linii produkcyjnych, koszty naprawy i wymiany narzędzi, Koszty dodatkowych operacji kontrolnych i naprawczych, koszty związane z reklamacjami klientów i zwrotami produktów |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Wykonanie porównania kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów za lata 2022 i 2023 w celu zidentyfikowania zmian, trendów i wzorców. Ustalenie, czy koszty wzrosły czy spadły oraz jakie były główne przyczyny tych zmian.                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Sporządzenie szczegółowego raportu z wyników analizy, który będzie zawierał: opis metodologii zbierania i analizy danych, szczegółowe zestawienia kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów za 2022 i 2023 rok, wnioski z analizy porównawczej                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   |                                                                                                                                                                                 | Wprowadzenie systemu redukcji kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów (procesy działania, praca z danymi, metodyka, itp.)                                                                                                                                                                                                                                           | Przeprowadzenie szczegółowej analizy obecnych procesów produkcyjnych i kosztów nieodpowiedniej jakości wyrobów. Identyfikacja głównych źródeł problemów jakościowych oraz związanych z nimi kosztów. |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   | Opracowanie standardowych procedur operacyjnych (SOP) dla każdego etapu procesu produkcyjnego, które będą zawierały wytyczne dotyczące kontroli jakości i zarządzania jakością. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                   | Przeprowadzenie szkoleń z systemów zarządzania jakością ISO 9001, w celu standaryzacji procesów i zapewnienia zgodności z międzynarodowymi standardami jakości.                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                      |                     |                    |                                         |                                                                                              |   |   |   |   |                                                 |   |   |   |   |   |   |  |

Tab. Z.7. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część II

| Obszar: Jakość |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                | RASCI<br>Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji celu<br>R odpowiedzialny za realizację celu<br>A zatwierdzający plan, budżet, realizację celu<br>S wspierający realizację lub wykonawca<br>C należy z nim skonsultować<br>I ma zostać poinformowany wykonawca/-cy |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony<br>S konkretny<br>M mierzalny<br>A osiągalny<br>R realistyczny<br>T ograniczony w czasie<br>E zweryfikowany<br>R zapisany |   |   |   |   |   |   |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| KONTEKST       |                                                                                                                             | Dążenie do wykonania pracy dobrze za pierwszym razem (zgodnie z założeniem).<br>Jakość rozumiana również jako redukcja zmienności parametrów procesowych będzie wspierała wzrost wydajności i dostępności maszyn. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
| L p            | Cel                                                                                                                         | Kluczowe działania /lub etapy w realizacji celu/                                                                                                                                                                  | Wymagania ilościowo-jakościowe; określ stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Wskaźnik wykonania celu /rodzaj/                                                                                                                                                                                                      | Poziom wskaźnika   | Miara wskaźnika | Wskaźnik wykonania celu termin | R                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | A | S | C | I | S                                                                                                                                                                         | M | A | R | T | E | R |
| 2              | Redukcja powtarzających się problemów jakościowych                                                                          |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | RQIFR - Recurring Quality Issues<br>Frequency Rate - wskaźnik Częstości Powtarzających się Problemów Jakościowych (stosunek liczby powtarzających się problemów jakościowych do całkowitej liczby zgłoszonych problemów jakościowych) | Redukcja o 20% rdr | %               | 31.12.2024                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                | Stworzenie bazy powtarzających się problemów jakościowych (gdzie powstaje, jak często występuje, jakich wyrobów dotyczy)    |                                                                                                                                                                                                                   | Zbieranie danych o wszystkich problemach jakościowych, które wystąpiły w procesie produkcyjnym. Dane te powinny obejmować: miejsce powstawania problemu (np. konkretna linia produkcyjna, maszyna, etap procesu), częstotliwość występowania problemu, szczegółowy opis problemu, rodzaje wyrobów, których dotyczy problem, datę i godzinę wystąpienia problemu, działania naprawcze podjęte w celu rozwiązania problemu |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Opracowanie standardowego formatu danych, który będzie używany do rejestracji problemów jakościowych. Standaryzacja umożliwi łatwiejszą analizę i porównanie danych.                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                | Sparametryzowanie powtarzających się problemów jakościowych                                                                 |                                                                                                                                                                                                                   | Określenie kluczowych parametrów, które będą mierzone i monitorowane dla powtarzających się problemów jakościowych: czas postoju (korekta) - czas, w którym produkcja jest zatrzymana z powodu wymaganej korekty jakościowej                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Określenie kluczowych parametrów, które będą mierzone i monitorowane dla powtarzających się problemów jakościowych: Re-work - dodatkowe koszty i czas związane z ponownym przetwarzaniem wyrobów                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Określenie kluczowych parametrów, które będą mierzone i monitorowane dla powtarzających się problemów jakościowych: czas postoju (awaria) - czas, w którym produkcja jest zatrzymana z powodu wymaganej naprawy maszyny lub urządzenia                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Określenie kluczowych parametrów, które będą mierzone i monitorowane dla powtarzających się problemów jakościowych: liczba sztuk brakowych na dalszych etapach produkcji, gdy przyczyna wady jest w poprzedzających operacjach technologicznych                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Określenie kluczowych parametrów, które będą mierzone i monitorowane dla powtarzających się problemów jakościowych: materiał - ilość materiałów niezbędnych do naprawy lub odtworzenia wyrobów posiadających wady jakościowe                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                | Wprowadzenie systemu redukcji powtarzających się problemów jakościowych (procesy działania, praca z danymi, metodyka, itp.) |                                                                                                                                                                                                                   | Przeprowadzenie regularnych analiz zebranych danych w celu identyfikacji wzorców i trendów. Analiza powinna obejmować: najczęściej występujące problemy, najbardziej problematyczne miejsca w procesie produkcyjnym, wyroby najbardziej narażone na problemy jakościowe, częstotliwość występowania problemów w określonym czasie                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Przeprowadzenie regularnych analiz zebranych danych w celu identyfikacji głównych przyczyn powtarzających się problemów jakościowych. Wykorzystanie narzędzi takich jak analiza Pareto i diagram Ishikawy.                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Opracowanie regularnych raportów i wizualizacji danych, które będą prezentowane zespołom produkcyjnym i zarządowi. Raporty powinny zawierać kluczowe wskaźniki jakości oraz wnioski z analizy.                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Wdrożenie systemu monitorowania i raportowania: automatyzacja procesu zbierania danych, jakościowych w czasie rzeczywistym, integracja z istniejącymi systemami, tworzenie dashboardów i raportów                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Opracowanie i wdrożenie skutecznych działań korygujących mających na celu eliminację źródeł problemów. Monitorowanie skuteczności wdrożonych działań i wprowadzanie niezbędnych korekt.                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   | Opracowanie działań zapobiegawczych mających na celu uniknięcie ponownego wystąpienia problemów                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |   |   |   |                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |   |   |

Tab. Z.8. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część III

| Obszar: Jakość                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                | RASCI                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |   |   |   | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|--|
| KONTEKST                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                | Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji celu<br>R odpowiedzialny za realizację celu<br>A zatwierdzający plan, budżet, realizację celu<br>S wspierający realizację lub wykonawca<br>C należy z nim skonsultować<br>I ma zostać poinformowany wykonawca/-cy |   |   |   |   | S konkretny<br>M mierzalny<br>A osiągalny<br>R realistyczny<br>T ograniczony w czasie<br>E zweryfikowany<br>R zapisany |   |   |   |   |   |   |  |
| Dążenie do wykonania pracy dobrze za pierwszym razem (zgodnie z założeniem).<br>Jakość rozumiana również jako redukcja zmienności parametrów procesowych będzie wspierała wzrost wydajności i dostępności maszyn. |                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                                                                                                                                                                                                                                  |   |   |   |   | WERYFIKACJA                                                                                                            |   |   |   |   |   |   |  |
| Lp                                                                                                                                                                                                                | Cel                                                                                                                     | Kluczowe działania /lub etapy w realizacji celu/                                                                                                                                                            | Wymagania ilościowo-jakościowe; określ stan docelowy i działania - co konkretnie ma zostać zrealizowane aby osiągnąć cel | Wskaźnik wykonania celu /rodzaj/                                                                                                                                  | Poziom wskaźnika   | Miara wskaźnika | Wskaźnik wykonania celu termin | R                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | A | S | C | I | S                                                                                                                      | M | A | R | T | E | R |  |
| 3                                                                                                                                                                                                                 | Redukcja liczby korekt jakościowych w procesie produkcji                                                                |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                          | QCRF - Quality Correction Frequency Rate - Wskaźnik Liczby Korekt Jakościowych (stosunek liczby korekt jakościowych do całkowitej liczby wyprodukowanych wyrobów) | Redukcja o 15% rdr | %               | 31.12.2024                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   | Praca nad przyczynami źródłowymi korekt jakościowych wg. Pareto (przez zespół)                                          | Gromadzenie danych na temat korekt jakościowych z systemów monitorowania i rejestracji jakości, w tym raporty z produkcji. Klasyfikacja problemów według ich częstotliwości, wpływu na produkcję i kosztów. |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Stworzenie wykresu Pareto, który przedstawia przyczyny problemów jakościowych w kolejności ich wpływu na ogólną liczbę korekt.                                                                              |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   | Gromadzenie i analiza danych jakościowych                                                                               | Dokładne badanie głównych przyczyn korekt jakościowych zidentyfikowanych w analizie Pareto. Przykłady przyczyn: błędy operatorów, awarie maszyn, jakość surowców.                                           |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Sporządzanie szczegółowych raportów opisujących każdą zidentyfikowaną przyczynę, jej wpływ na proces produkcji oraz rekomendowane rozwiązania.                                                              |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Weryfikacja przyczyn poprzez przeprowadzenie testów i eksperymentów w celu potwierdzenia ich wpływu na problemy jakościowe. Gromadzenie danych potwierdzających związek przyczyny z problemem jakościowym.  |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Integracja danych z różnych źródeł do jednego, spójnego systemu bazy danych.                                                                                                                                |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   | Wprowadzenie standardów i procedur jakościowych                                                                         | Opracowanie standardów dla zbierania i rejestrowania danych, aby zapewnić jednolitość i spójność informacji.                                                                                                |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Przeprowadzenie szkoleń dla 100% pracowników dotyczących nowych procedur monitorowania jakości oraz utrzymania i konserwacji narzędzi produkcyjnych.                                                        |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Wprowadzenie działań mających na celu natychmiastowe eliminowanie zidentyfikowanych przyczyn problemów. Przykłady: poprawa procedur kontrolnych, naprawa awarii sprzętu, modyfikacja parametrów produkcji.  |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Sporządzanie szczegółowych planów działań korygujących oraz dokumentowanie ich implementacji i wyników.                                                                                                     |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Opracowanie działań zapobiegawczych, takich jak poprawa standardów jakości, zmiana procedur operacyjnych, wprowadzenie szkoleń dla pracowników.                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   | Wprowadzenie systemu redukcji liczby korekt jakościowych w procesie (procesy działania, praca z danymi, metodyka, itp.) | Weryfikacja przyczyn poprzez przeprowadzenie testów i eksperymentów w celu potwierdzenia ich wpływu na problemy jakościowe. Gromadzenie danych potwierdzających związek przyczyny z problemem jakościowym.  |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Przeprowadzenie audytów procesów produkcyjnych w celu identyfikacji obszarów wymagających poprawy. Ocena aktualnych procedur i standardów jakości, aby zrozumieć ich wpływ na liczbę korekt.                |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Wprowadzenie działań mających na celu natychmiastowe eliminowanie zidentyfikowanych przyczyn problemów. Przykłady: poprawa procedur kontrolnych, naprawa awarii sprzętu, modyfikacja parametrów produkcji.  |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Implementacja systemów monitorowania i kontroli w celu wykrywania problemów na wczesnym etapie i zapobiegania ich ponownemu wystąpieniu.                                                                    |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Monitorowanie skuteczności wdrożonych działań korygujących i zapobiegawczych poprzez regularne przeglądy i analizę wskaźników jakości.                                                                      |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Wybór odpowiednich narzędzi analitycznych i statystycznych, takich jak oprogramowanie do analizy danych i wizualizacji wyników.                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |
|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                         | Regularne zbieranie feedbacku od pracowników na temat skuteczności działań korygujących i wprowadzanie odpowiednich dostosowań.                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                   |                    |                 |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |   |   |                                                                                                                        |   |   |   |   |   |   |  |

Tab. Z 9. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część IV

| Obszar: Jakość |                         |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                     |                          |   |            | RASCI<br>Określ zakres odpowiedzialności / rolę jaką mają pełnić poszczególne osoby w realizacji celu<br>R odpowiedzialny za realizację celu<br>A zatwierdzający plan, budżet, realizację celu<br>S wspierający realizację lub wykonawca<br>C należy z nim skonsultować<br>I ma zostać poinformowany wykonawca/-cy |  |  |  |  | Upewnij się, że cel został poprawnie wyznaczony<br>S konkretny<br>M mierzalny<br>A osiągalny<br>R realistyczny<br>T ograniczony w czasie<br>E zweryfikowany<br>R zapisany |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| KONTEKST       |                         | Dążenie do wykonania pracy dobrze za pierwszym razem (zgodnie z założeniem).<br>Jakość rozumiana również jako redukcja zmienności parametrów procesowych będzie wspierała wzrost wydajności i dostępności maszyn. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                     |                          |   |            | ZAKRES ODPOWIEDZIALNOŚCI                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |  |  |  | WERYFIKACJA                                                                                                                                                               |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | SC - Scrap Ratio - Wskaźnik Braków (stosunek ilości wyprodukowanych wadliwych wyrobów do całkowitej ilości wyprodukowanych wyrobów) | Redukcja do poziomu 0,5% | % | 31.12.2024 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
| 4              | Redukcja poziomu braków | Praca nad przyczynami źródłowymi wad jakościowych wg. Pareto (przez zespół)                                                                                                                                       | Zastosowanie analizy Pareto (80/20) do identyfikacji najczęstszych i najbardziej kosztownych problemów jakościowych. Ustalenie, które przyczyny stanowią największy procent problemów.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         | Gromadzenie i analiza danych jakościowych                                                                                                                                                                         | Opracowanie systemu gromadzenia danych - określenie kluczowych wskaźników jakościowych, które będą monitorowane, takich jak liczba braków.<br>Dokładne badanie głównych przyczyn powstawania wyrobów brakowych zidentyfikowanych w analizie Pareto. Przykłady przyczyn: błędy operatorów, awarie maszyn, jakość surowców.<br>Sporządzanie szczegółowych raportów opisujących każdą zidentyfikowaną przyczynę, jej wpływ na proces produkcji oraz rekomendowane rozwiązania.<br>Weryfikacja przyczyn poprzez przeprowadzenie testów i eksperymentów w celu potwierdzenia ich wpływu na problemy jakościowe. Gromadzenie danych potwierdzających związek przyczyny z powstaniem wyrobu niezgodnego.<br>Integracja danych z różnych źródeł do jednego, spójnego systemu bazy danych.<br>Opracowanie standardów dla zbierania i rejestrowania danych, aby zapewnić jednolitość i spójność informacji. |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         | Wprowadzenie standardów i procedur jakościowych                                                                                                                                                                   | Przeprowadzenie szkoleń dla 100% pracowników dotyczących nowych procedur monitorowania jakości oraz utrzymania i konserwacji narzędzi produkcyjnych.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Zbieranie informacji na temat wymagań jakościowych od klientów, norm branżowych oraz przepisów prawnych. Przygotowanie szczegółowej dokumentacji zawierającej standardy jakościowe, specyfikacje materiałów, procesy produkcyjne i wymagania dotyczące kontroli jakości.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Przegląd i korekta standardów na podstawie wyników testów oraz feedbacku od pracowników i ekspertów.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Opracowanie szczegółowych procedur kontrolnych, które będą stosowane w różnych etapach produkcji, takich jak kontrola surowców, kontrola procesów, oraz kontrola końcowa. Określenie częstotliwości i metod kontroli, takich jak inspekcje, testy laboratoryjne i kontrole wizualne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Przeszkolenie pracowników w zakresie nowych procedur kontroli jakości, w tym w zakresie stosowania narzędzi i technik kontrolnych.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Opracowanie procedur dokumentowania wyników kontroli jakości oraz zarządzania dokumentacją jakościową. Regularne audyty wewnętrzne w celu oceny zgodności z nowymi standardami i procedurami oraz identyfikacji obszarów do poprawy.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         | Wprowadzenie systemu redukcji ogólnej liczby braków w procesie produkcji (procesy działania, praca z danymi, metodyka, itp.)                                                                                      | Sporządzenie szczegółowej dokumentacji wszystkich etapów procesu produkcji, w tym procesów wejściowych, przetwarzania i wyjściowych, oraz identyfikacja punktów krytycznych, w których mogą występować braki.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Wykorzystanie narzędzi takich jak diagramy przepływu procesów (VSM) i analizy przyczyn i skutków (FMEA) w celu zidentyfikowania potencjalnych źródeł braków i oceny ryzyka.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Zbieranie i analizowanie danych dotyczących powstawania braków, takich jak wskaźniki wadliwości, przyczyny braków, oraz koszty związane z ich eliminowaniem. Identyfikacja i priorytetyzacja obszarów wymagających poprawy na podstawie analizy danych i mapowania procesów.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Wybór odpowiednich narzędzi i technologii do zbierania danych.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Wdrożenie systemów monitorowania, które umożliwiają bieżące śledzenie wyników kontroli jakości oraz identyfikowanie niezgodności.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Wybór odpowiednich narzędzi analitycznych i statystycznych, takich jak oprogramowanie do analizy danych i wizualizacji wyników.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |
|                |                         |                                                                                                                                                                                                                   | Regularna analiza wyników procesu produkcji, w tym liczby braków, skuteczności działań kontrolnych oraz efektywności działań korygujących                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                     |                          |   |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |                                                                                                                                                                           |  |  |  |  |  |  |  |



Tab. Z.11. Pozyskiwane parametry – operacja cięcia – pila ADIGE 1

| Node Id       | Display Name           | Value                 | Datatype |
|---------------|------------------------|-----------------------|----------|
| NS4 Numeric 9 | Alarm                  | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 5 | Liczba wykonana        | szt.                  | Int32    |
| NS4 Numeric 4 | Liczba zadana          | szt.                  | Int32    |
| NS4 Numeric 7 | Tryb Auto              | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 8 | Tryb Manual            | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 2 | Zadana prędkość cięcia | obroty/minutę         | Float    |
| NS4 Numeric 3 | Zadany posuw           | posuw na ostrze (zęb) | Float    |

Tab. Z.12. Pozyskiwane parametry – operacja cięcia – pila ADIGE 2

| Node Id       | Display Name           | Value                 | Datatype |
|---------------|------------------------|-----------------------|----------|
| NS4 Numeric 9 | Alarm                  | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 5 | Liczba wykonana        | szt.                  | Int32    |
| NS4 Numeric 4 | Liczba zadana          | szt.                  | Int32    |
| NS4 Numeric 7 | Tryb Auto              | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 8 | Tryb Manual            | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 2 | Zadana prędkość cięcia | obroty/minutę         | Float    |
| NS4 Numeric 3 | Zadany posuw           | posuw na ostrze (zęb) | Float    |

Tab. Z.13. Pozyskiwane parametry – operacja cięcia – pila ADIGE 3

| Node Id       | Display Name           | Value                 | Datatype |
|---------------|------------------------|-----------------------|----------|
| NS4 Numeric 9 | Alarm                  | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 5 | Liczba wykonana        | szt.                  | Int32    |
| NS4 Numeric 4 | Liczba zadana          | szt.                  | Int32    |
| NS4 Numeric 6 | Średnica pręta         | mm                    | Float    |
| NS4 Numeric 7 | Tryb Auto              | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 8 | Tryb Manual            | false/true            | Boolean  |
| NS4 Numeric 2 | Zadana prędkość cięcia | obroty/minutę         | Float    |
| NS4 Numeric 3 | Zadany posuw           | posuw na ostrze (zęb) | Float    |

Tab. Z.14. Pozyskiwane parametry – kucie matrycowe – ME 250

| Name   | Description                               | Oznaczenie cechy                            |
|--------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 00_CYC | calipso : Cycle Machine                   | Liczba cykli pracy                          |
| 01_DIE | calipso : die numeric code                | Kod matrycy                                 |
| 02_TB1 | calipso : billet temperatur 1 (°C)        | Temperatura wsadu 1 (°C)                    |
| 03_TB2 | calipso : billet temperatur 2 (°C)        | Temperatura wsadu 2 (°C)                    |
| 04_FM  | calipso : machine force (kN)              | Siła kompresji (zamknięcia matrycy)<br>(kN) |
| 05_SP1 | calipso : punch 1 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 1 (0.01mm)          |
| 06_SP2 | calipso : punch 2 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 2 (0.01mm)          |
| 07_SP3 | calipso : punch 3 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 3 (0.01mm)          |
| 08_SP4 | calipso : punch 4 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 4 (0.01mm)          |
| 09_SP5 | calipso : punch 5 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 5 (0.01mm)          |

|                           |                                           |                                       |
|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| 10_TP1                    | calipso : punch 1 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 1 (ms)             |
| 11_TP2                    | calipso : punch 2 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 2 (ms)             |
| 12_TP3                    | calipso : punch 3 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 3 (ms)             |
| 13_TP4                    | calipso : punch 4 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 4 (ms)             |
| 14_TP4                    | calipso : punch 5 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 5 (ms)             |
| tomes_1_Watchdog          | MES : communication check                 | Sprawdzenie komunikacji               |
| tomes_13_good_prod        | MES : good pieces quantity                | Liczba dobrych sztuk                  |
| tomes_14_bad_prod_calipso | MES : bad pieces quantity from startup    | Liczba braków z rozruchu              |
| tomes_15_bad_prod_startup | MES : bad pieces quantity from calipso    | Liczba braków z Calipso               |
| tomes_16_bad_prod_stop    | MES : bad pieces quantity from stop cycle | Liczba braków z niedokończonego cyklu |
| tomes_17_partial_prod     | MES : pieces partial quantity             | Częściowa produkcja                   |
| tomes_18_total_prod       | MES : pieces total quantity               | Liczba wyprodukowanych sztuk          |
| tomes_19_quantity         | MES : quantity of pieces to be produced   | Wielkość partii do produkcji          |
| tomes_2_mach_on           | MES : machine ON                          | Maszyna włączona                      |
| tomes_20_code_die         | MES : actual die code                     | Nazwa programu/detalu                 |
| tomes_21_order            | MES : actual los code                     | Nr zlecenia                           |
| tomes_22_description      | MES : actual die description              | Cecha matrycy                         |
| tomes_3_setup             | MES : machine in setup cycle              | Maszyna w cyklu konfiguracji          |
| tomes_4_impulse           | MES : impuls cycle                        | Impuls cyklu maszyny                  |
| tomes_5_autom             | MES : machine in automatic cycle          | Maszyna w cyklu automatycznym         |
| tomes_6_manual            | MES : machine in manual cycle             | Maszyna w cyklu manualnym             |
| tomes_7_alarm             | MES : machine alarm                       | Alarm                                 |
| tomes_8_warning           | MES : machine warning                     | Ostrzeżenie                           |

Tab. Z.15. Pozyskiwane parametry – kucie matrycowe – ME 350

| Name   | Description                               | Oznaczenie cechy                         |
|--------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| 00_CYC | calipso : Cycle Machine                   | Liczba cykli pracy                       |
| 01_DIE | calipso : die numeric code                | Kod matrycy                              |
| 02_TB1 | calipso : billet temperatur 1 (°C)        | Temperatura wsadu 1 (°C)                 |
| 03_TB2 | calipso : billet temperatur 2 (°C)        | Temperatura wsadu 2 (°C)                 |
| 04_FM  | calipso : machine force (kN)              | Siła kompresji (zamknięcia matrycy) (kN) |
| 05_SP1 | calipso : punch 1 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 1 (0.01mm)       |
| 06_SP2 | calipso : punch 2 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 2 (0.01mm)       |
| 07_SP3 | calipso : punch 3 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 3 (0.01mm)       |
| 08_SP4 | calipso : punch 4 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 4 (0.01mm)       |
| 09_SP5 | calipso : punch 5 final position (0.01mm) | Pozycja końcowa stempla 5 (0.01mm)       |
| 10_TP1 | calipso : punch 1 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 1 (ms)                |
| 11_TP2 | calipso : punch 2 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 2 (ms)                |
| 12_TP3 | calipso : punch 3 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 3 (ms)                |
| 13_TP4 | calipso : punch 4 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 4 (ms)                |
| 14_TP5 | calipso : punch 5 time ( ms)              | Czas ruchu stempla 5 (ms)                |

|                           |                                           |                                       |
|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| 15_FP1                    | calipso : punch 1 force (kN)              | Siła stempla 1 (kN)                   |
| 16_FP2                    | calipso : punch 2 force (kN)              | Siła stempla 2 (kN)                   |
| 17_FP3                    | calipso : punch 3 force (kN)              | Siła stempla 3 (kN)                   |
| 18_FP4                    | calipso : punch 4 force (kN)              | Siła stempla 4 (kN)                   |
| 19_FP5                    | calipso : punch 5 force (kN)              | Siła stempla 5 (kN)                   |
| tomes_1_Watchdog          | MES : communication check                 | Sprawdzenie komunikacji               |
| tomes_13_good_prod        | MES : good pieces quantity                | Liczba dobrych sztuk                  |
| tomes_14_bad_prod_calipso | MES : bad pieces quantity from startup    | Liczba braków z rozruchu              |
| tomes_15_bad_prod_startup | MES : bad pieces quantity from calipso    | Liczba braków z Calipso               |
| tomes_16_bad_prod_stop    | MES : bad pieces quantity from stop cycle | Liczba braków z niedokończonego cyklu |
| tomes_17_partial_prod     | MES : pieces partial quantity             | Częściowa produkcja                   |
| tomes_18_total_prod       | MES : pieces total quantity               | Liczba wyprodukowanych sztuk          |
| tomes_19_quantity         | MES : quantity of pieces to be produced   | Wielkość partii do produkcji          |
| tomes_2_mach_on           | MES : machine ON                          | Maszyna włączona                      |
| tomes_20_code_die         | MES : actual die code                     | Nazwa programu/detału                 |
| tomes_21_order            | MES : actual los code                     | Nr zlecenia                           |
| tomes_22_description      | MES : actual die description              | Cecha matrycy                         |
| tomes_3_setup             | MES : machine in setup cycle              | Maszyna w cyklu konfiguracji          |
| tomes_4_impulse           | MES : impuls cycle                        | Impuls cyklu maszyny                  |
| tomes_5_autom             | MES : machine in automatic cycle          | Maszyna w cyklu automatycznym         |
| tomes_6_manual            | MES : machine in manual cycle             | Maszyna w cyklu manualnym             |
| tomes_7_alarm             | MES : machine alarm                       | Alarm                                 |
| tomes_8_warning           | MES : machine warning                     | Ostrzeżenie                           |

Tab. Z.16. Pozyskiwane parametry – śrutowanie – OWT

| Node Id        | Display Name              | Value         | Datatype |
|----------------|---------------------------|---------------|----------|
| NS4 Numeric 12 | AktualnyCzasCyklu         | minuty        | UInt32   |
| NS4 Numeric 15 | Automat                   | false/true    | Boolean  |
| NS4 Numeric 16 | AutomatCykl               | false/true    | Boolean  |
| NS4 Numeric 8  | CzasPracyWirnika          | godziny       | Float    |
| NS4 Numeric 9  | IloscWykonanychCykli      | cykle         | Int32    |
| NS4 Numeric 5  | PradWirnika               | A             | Float    |
| NS4 Numeric 6  | PredkoscWirnika           | obroty/minutę | Float    |
| NS4 Numeric 14 | Reczne                    | false/true    | Boolean  |
| NS4 Numeric 4  | RzeczywistyCzasSrutowania | godziny       | Float    |
| NS4 Numeric 13 | Serwis                    | false/true    | Boolean  |
| NS4 Numeric 7  | StanPracy                 | false/true    | Boolean  |
| NS4 Numeric 11 | ZadanyCzasCyklu           | minuty        | UInt32   |

Tab. Z.17. Pozyskiwane parametry – obróbka skrawaniem – G233

| Node Id                                               | Value   | Oznaczenie cechy                       |
|-------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Production.CycleTime.RealTime | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "22F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Power.TotalUnitConsumption    | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "22F"   |

|                                                                |         |                                               |
|----------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "22F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "22F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C       | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "22F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "22F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "22F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "22F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "32F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "32F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "32F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "32F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "32F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "32F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "32F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "23F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "23F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "23F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "23F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "23F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "33F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "33F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "33F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "33F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "33F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Production.CycleTime.RealTime           | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "21F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalUnitConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "21F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalAxesConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "21F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalSpindlesConsumption          | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "21F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature      | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "21F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Production.CycleTime.RealTime           | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "31F"        |

|                                                            |             |                                                        |
|------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalUnitConsumption          | kWh         | Całkowity pobór mocy jednostki "31F"                   |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalAxesConsumption          | kWh         | Całkowity pobór mocy osi jednostki "31F"               |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalSpindlesConsumption      | kWh         | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "31F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature  | C           | Temperatura silnika osi Z jednostki "31F"              |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.Status                            | 0/1/2/3/4/5 | Stan maszyny                                           |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.TotalPartProduction.PartsProduced | szt.        | Całkowita liczba wyprodukowanych sztuk wybranej części |
| GNUTTI.OUTPUT.MachinePower.Consumption                     | W           | Chwilowe zużycie energii przez maszynę                 |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.CycleTime.TurretTime              | sekundy     | Czas obrotu bębna                                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].Description     |             | Opis alarmu                                            |

Tab. Z.18. Pozyskiwane parametry – obróbka skrawaniem – G271

| Node Id                                                | Value   | Oznaczenie cechy                              |
|--------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Production.CycleTime.RealTime  | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "22F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Power.TotalUnitConsumption     | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "22F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Power.TotalAxesConsumption     | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "22F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Power.TotalSpindlesConsumption | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "22F" |

|                                                                |         |                                               |
|----------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C       | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "22F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "22F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "22F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[11].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "22F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "32F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "32F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "32F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "32F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "32F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "32F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "32F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "23F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "23F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "23F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "23F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[20].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "23F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "33F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "33F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "33F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "33F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[21].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "33F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Production.CycleTime.RealTime           | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "21F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalUnitConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "21F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalAxesConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "21F"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalSpindlesConsumption          | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "21F" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature      | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "21F"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Production.CycleTime.RealTime           | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "31F"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalUnitConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "31F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalAxesConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "31F"      |

|                                                            |             |                                                        |
|------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalSpindlesConsumption      | kWh         | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "31F"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature  | C           | Temperatura silnika osi Z jednostki "31F"              |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.Status                            | 0/1/2/3/4/5 | Stan maszyny                                           |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.TotalPartProduction.PartsProduced | szt.        | Całkowita liczba wyprodukowanych sztuk wybranej części |
| GNUTTI.OUTPUT.MachinePower.Consumption                     | W           | Chwilowe zużycie energii przez maszynę                 |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.CycleTime.TurretTime              | sekundy     | Czas obrotu bębna                                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].Description     |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].Code            |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].DateTime        |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].Description     |             | Opis alarmu                                            |

Tab. Z.19. Pozyskiwane parametry – obróbka skrawaniem – G434

| Node Id                                                        | Value   | Oznaczenie cechy                             |
|----------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "22"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "22"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "22"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "22" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C       | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "22" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "22"     |

|                                                                |         |                                              |
|----------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "22"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[12].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "22"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "32"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "32"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "32"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "32" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C       | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "32" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "32"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "32"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[13].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "32"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "23"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "23"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "23"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "23" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C       | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "23" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "23"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "23"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[22].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Y jednostki "23"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "33"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Power.TotalUnitConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "33"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Power.TotalAxesConsumption             | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "33"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "33" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C       | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "33" |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi Z jednostki "33"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[23].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C       | Temperatura silnika osi X jednostki "33"     |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Production.CycleTime.RealTime           | sekundy | Rzeczywisty czas pracy jednostki "21"        |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalUnitConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy jednostki "21"          |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalAxesConsumption              | kWh     | Całkowity pobór mocy osi jednostki "21"      |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Power.TotalSpindlesConsumption          | kWh     | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "21" |

|                                                               |             |                                                        |
|---------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C           | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "21"           |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C           | Temperatura silnika osi Z jednostki "21"               |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C           | Temperatura silnika osi X jednostki "21"               |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[2].Axes[3].Diagnosis.MotorTemperature     | C           | Temperatura silnika osi Y jednostki "21"               |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Production.CycleTime.RealTime          | sekundy     | Rzeczywisty czas pracy jednostki "31"                  |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalUnitConsumption             | kWh         | Całkowity pobór mocy jednostki "31"                    |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalAxesConsumption             | kWh         | Całkowity pobór mocy osi jednostki "31"                |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Power.TotalSpindlesConsumption         | kWh         | Całkowity pobór mocy wrzecion jednostki "31"           |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Spindles[1].Diagnosis.MotorTemperature | C           | Temperatura silnika wrzeciona jednostki "31"           |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Axes[1].Diagnosis.MotorTemperature     | C           | Temperatura silnika osi Z jednostki "31"               |
| GNUTTI.OUTPUT.Units[3].Axes[2].Diagnosis.MotorTemperature     | C           | Temperatura silnika osi X jednostki "31"               |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.Status                               | 0/1/2/3/4/5 | Stan maszyny                                           |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.TotalPartProduction.PartsProduced    | szt.        | Całkowita liczba wyprodukowanych sztuk wybranej części |
| GNUTTI.OUTPUT.MachinePower.Consumption                        | W           | Chwilowe zużycie energii przez maszynę                 |
| GNUTTI.OUTPUT.Production.CycleTime.TurretTime                 | sekundy     | Czas obrotu bębna                                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].Code               |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].DateTime           |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[1].Description        |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].Code               |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].DateTime           |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[2].Description        |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].Code               |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].DateTime           |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[3].Description        |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].Code               |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].DateTime           |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[4].Description        |             | Opis alarmu                                            |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].Code               |             | Kod alarmu                                             |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].DateTime           |             | Data i godzina wystąpienia alarmu                      |
| GNUTTI.OUTPUT.Diagnostics.MachineAlarms[5].Description        |             | Opis alarmu                                            |

Tab. Z.20. Pozyskiwane parametry – montaż

Port 1 – Linia 1 – Saterowanie

| Node Id                                                    | Display Name        | Value | Datatype | Opis                    |
|------------------------------------------------------------|---------------------|-------|----------|-------------------------|
| NS1 String IOLM Port 1 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Wartość siły docisku    |
| NS1 String IOLM Port 1 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Liczba cykli sumaryczna |

Port 2 – Linia 2 – Saterowanie

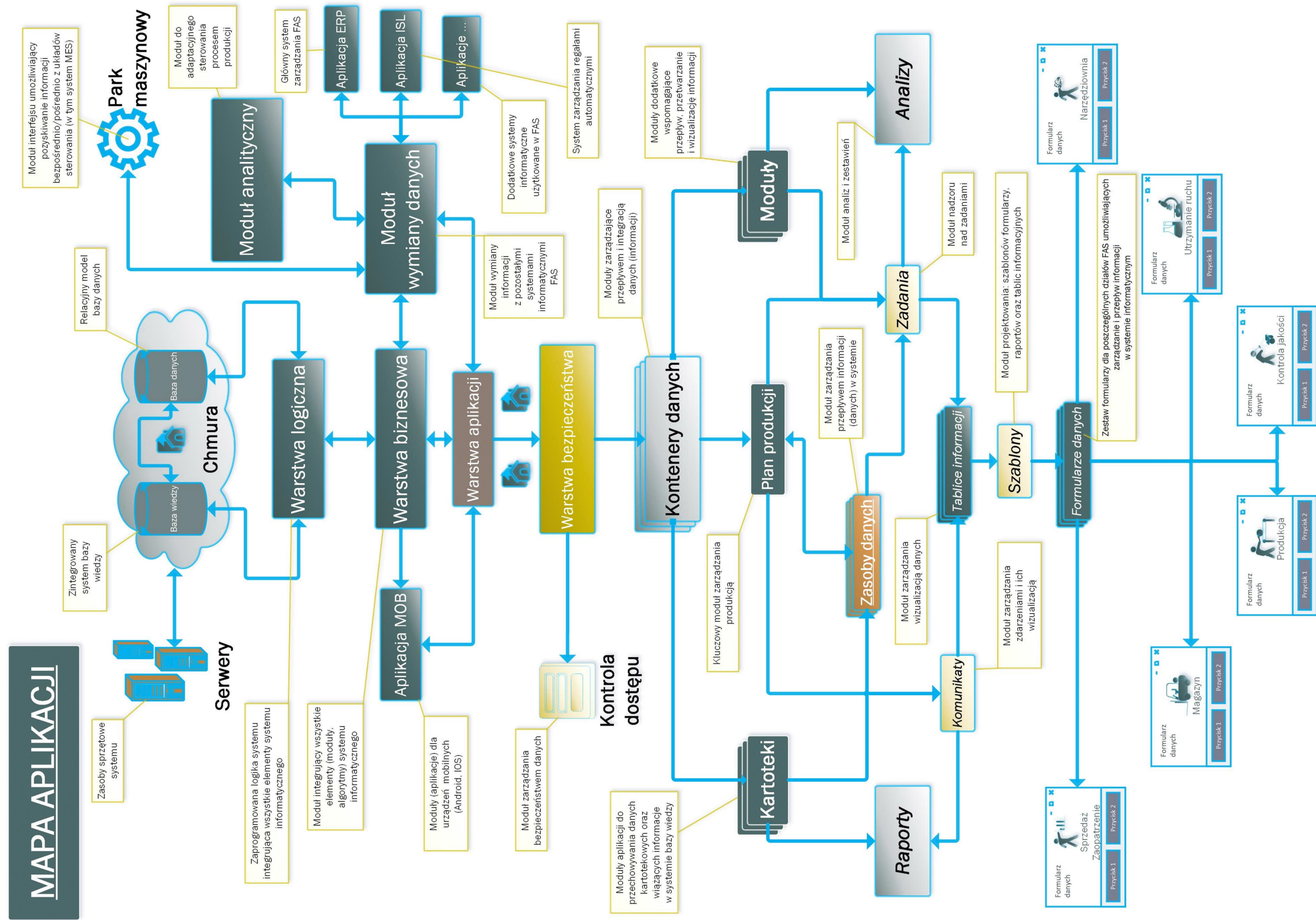
| Node Id                                                    | Display Name        | Value | Datatype | Opis                    |
|------------------------------------------------------------|---------------------|-------|----------|-------------------------|
| NS1 String IOLM Port 2 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Wartość siły docisku    |
| NS1 String IOLM Port 2 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Liczba cykli sumaryczna |

Port 3 – Linia 1 – Ośka

| Node Id                                                    | Display Name        | Value | Datatype | Opis                    |
|------------------------------------------------------------|---------------------|-------|----------|-------------------------|
| NS1 String IOLM Port 3 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Wartość siły docisku    |
| NS1 String IOLM Port 3 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Liczba cykli sumaryczna |

Port 4 – Linia 2 – Ośka

| Node Id                                                    | Display Name        | Value | Datatype | Opis                    |
|------------------------------------------------------------|---------------------|-------|----------|-------------------------|
| NS1 String IOLM Port 4 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Wartość siły docisku    |
| NS1 String IOLM Port 4 Attached Device PDI Data Byte Array | PDI Data Byte Array | bar   | Byte     | Liczba cykli sumaryczna |



Rys. Z.21. Opracowany schemat struktury systemu komputerowego



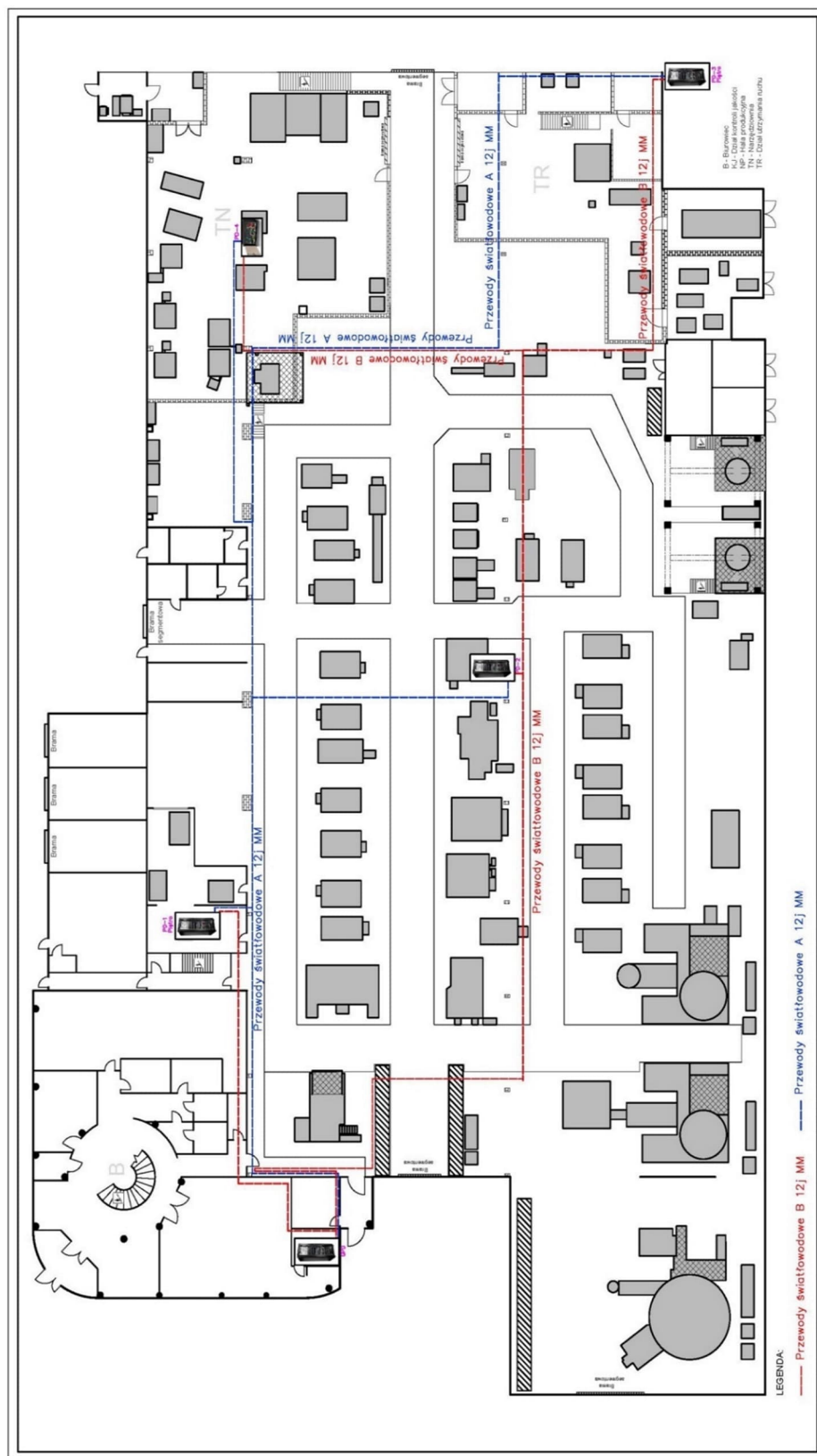
L.p. Maszyna/urządzenie:

1. Piła tarczowa ADIGE CM601
2. Piła tarczowa ADIGE CM601
3. Piła tarczowa ADIGE CM601
4. Prasa hydrauliczna MECOLPRESS 250 (ME250)
5. Prasa hydrauliczna MECOLPRESS 350 (ME350)
6. Oczyszczarka wirnikowa-taśmowa OWT-400
7. Obrabiarka transferowa GNUTTI 271 (G271)
8. Obrabiarka transferowa GNUTTI 233 (G233)
9. Obrabiarka transferowa GNUTTI 434 (G434)
10. Paletyzacja – stanowisko zrobotyzowane ARET
11. Maszyna pomiarowa WENZEL LH 65
12. Montaż korpusu wodomierza – praska hydrauliczna
13. Montaż korpusu wodomierza – praska

Rys. Z.22. Plan hal FAS z oznaczonymi maszynami i urządzeniami produkcyjnymi biorącymi udział w badaniach – rzut magazynu, kuźni, okrawalni i oczyszczalni



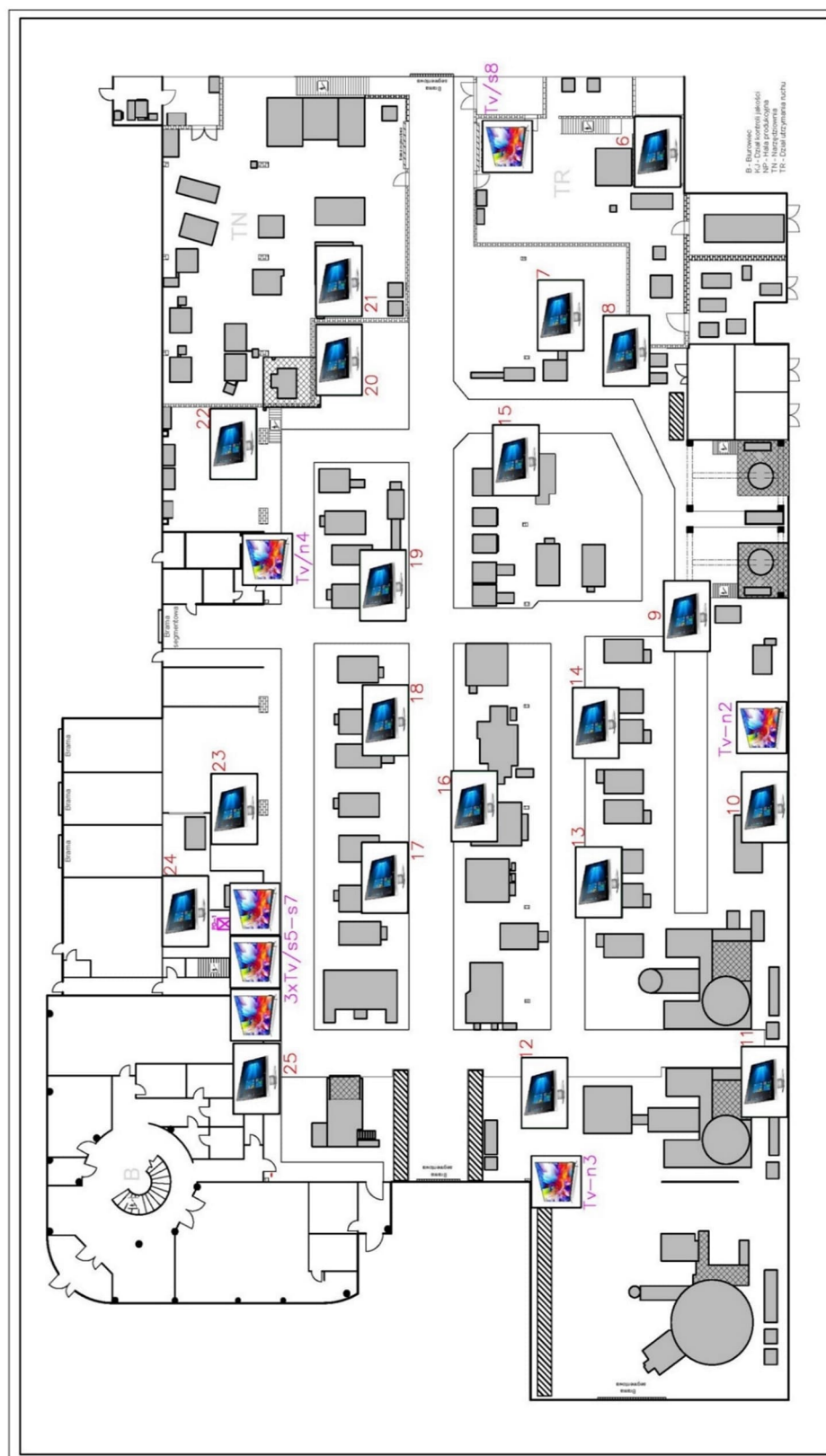
Rys. Z.23. Plan hal FAS z oznaczonymi maszynami i urządzeniami produkcyjnymi biorącymi udział w badaniach – rzut hali obróbki mechanicznej i montażu



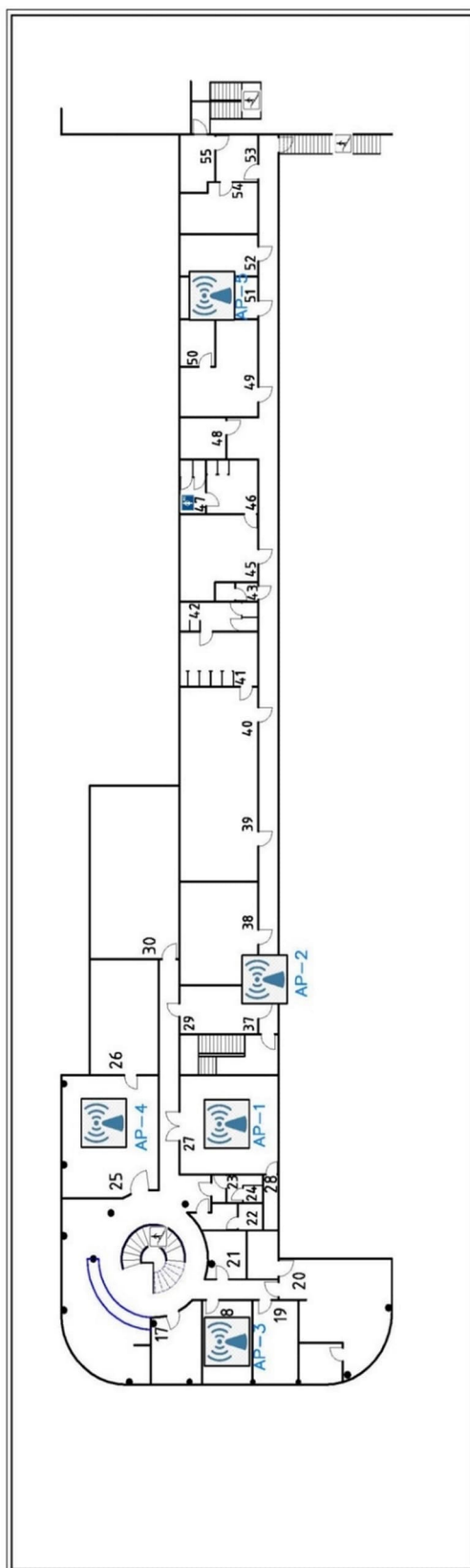
Rys. Z.24. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dystrybucji oraz przebiegiem linii światłowodowych



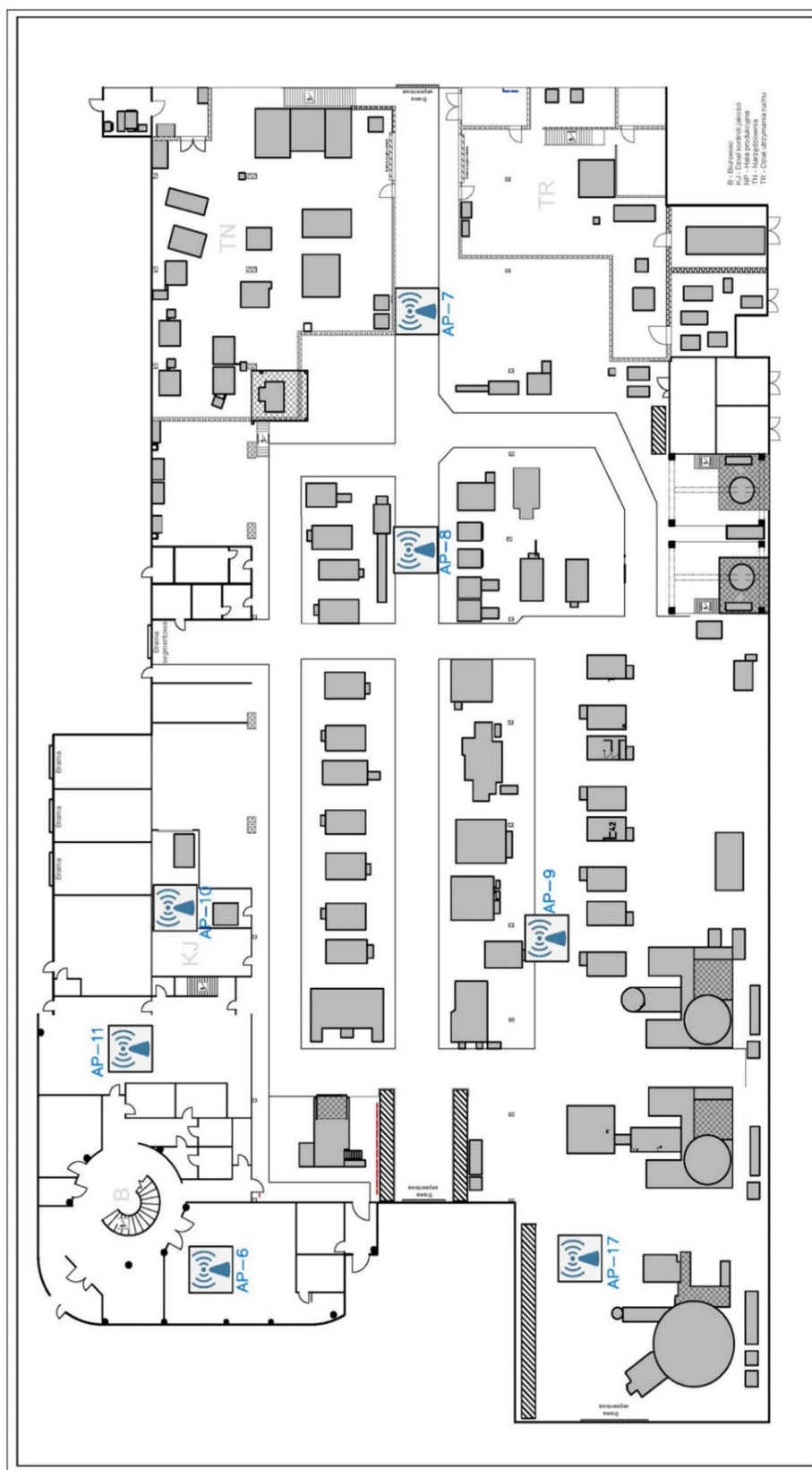
Rys. Z.25. Plan hal FAS z naniesionymi punktami wizualizacji i dostępu dla pracowników produkcji - rzut magazynu, kuźni, okrawalni i oczyszczalni



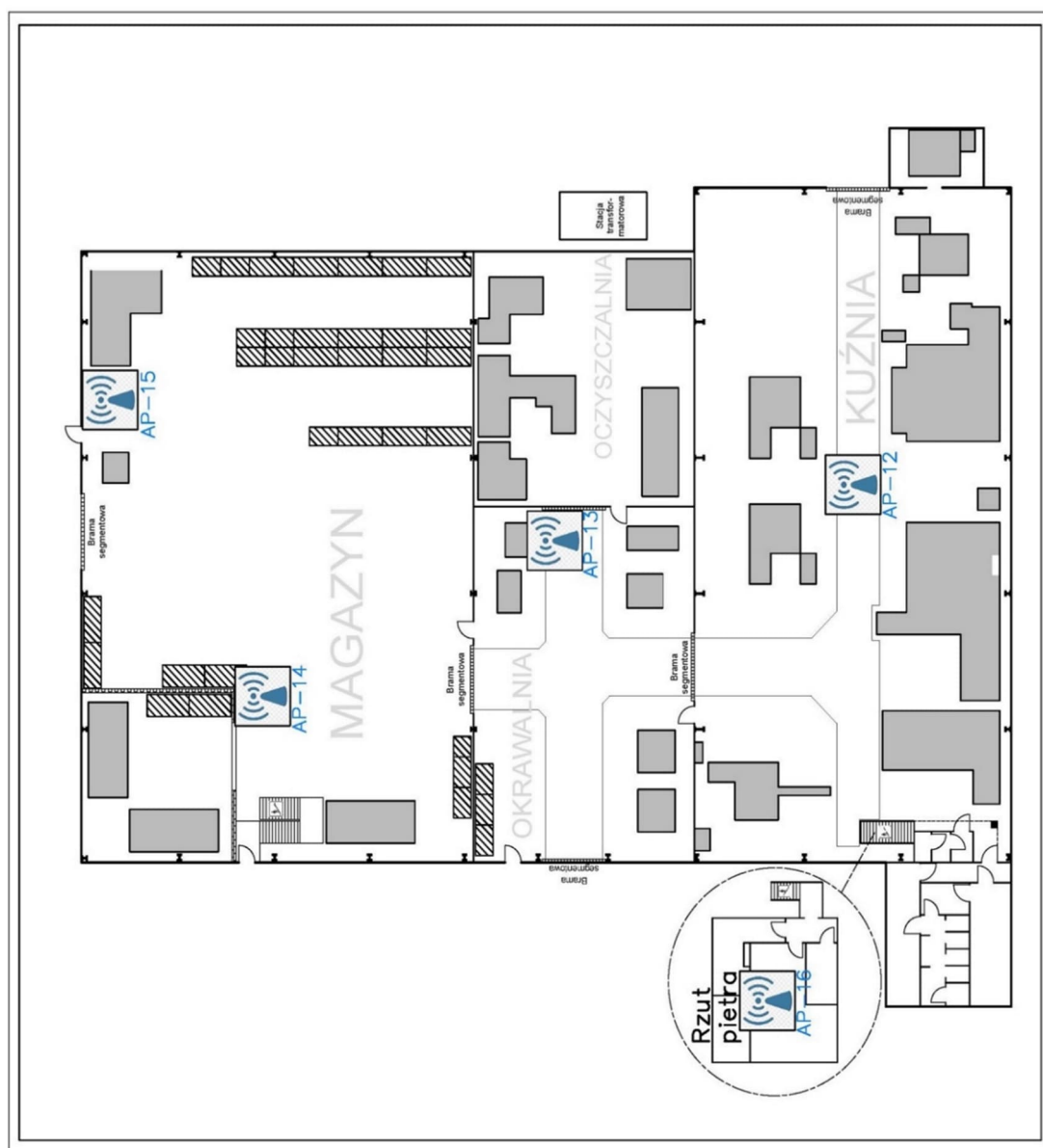
Rys. Z.26. Plan hal EAS z naniesionymi punktami wizualizacji i dostępu dla pracowników produkcji - rzut hali obróbki mechanicznej i montażu



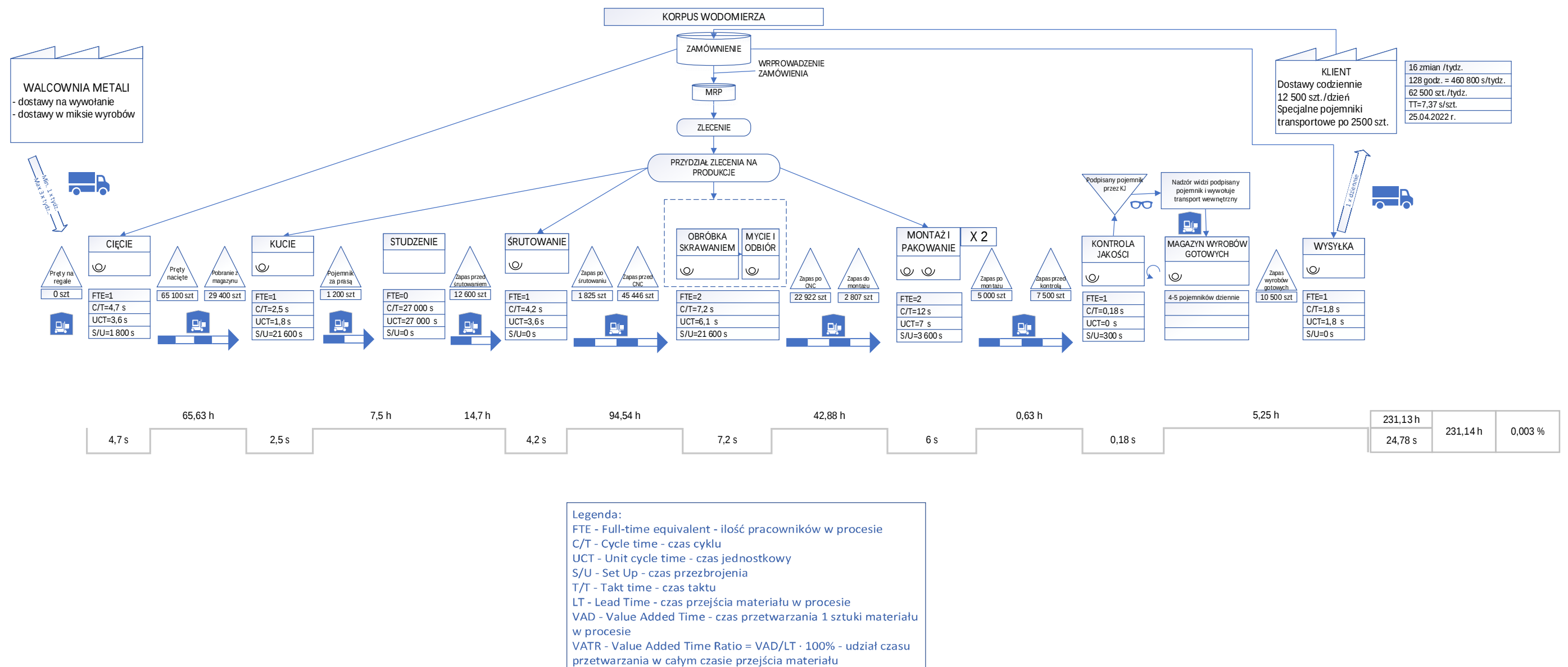
Rys. Z.27. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dostępu (AP – Access Point) - rozdystrybuowanie sygnału WiFi – rzut części biurowej



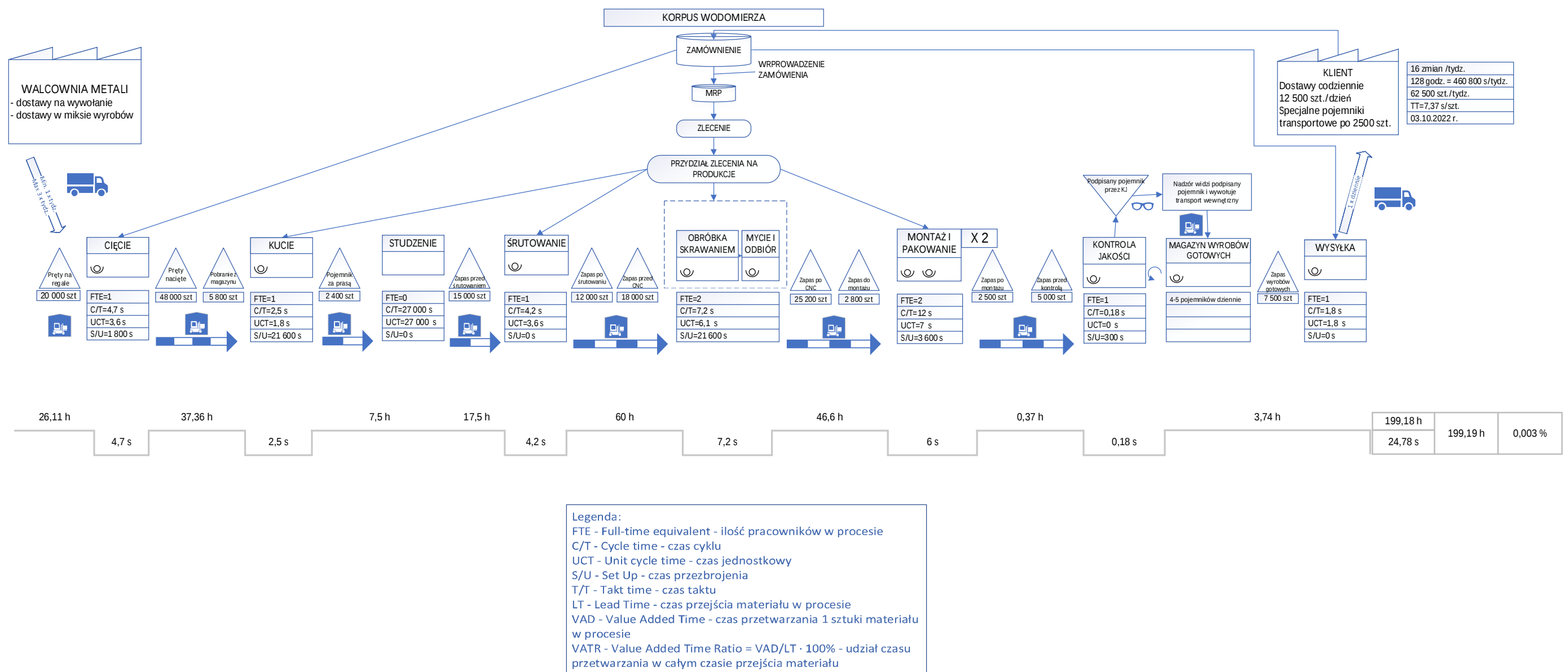
Rys. Z.28. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dostępu (AP – Access Point) - rozdyskrybuowanie sygnału WiFi - rzut hali obróbki mechanicznej i montażu



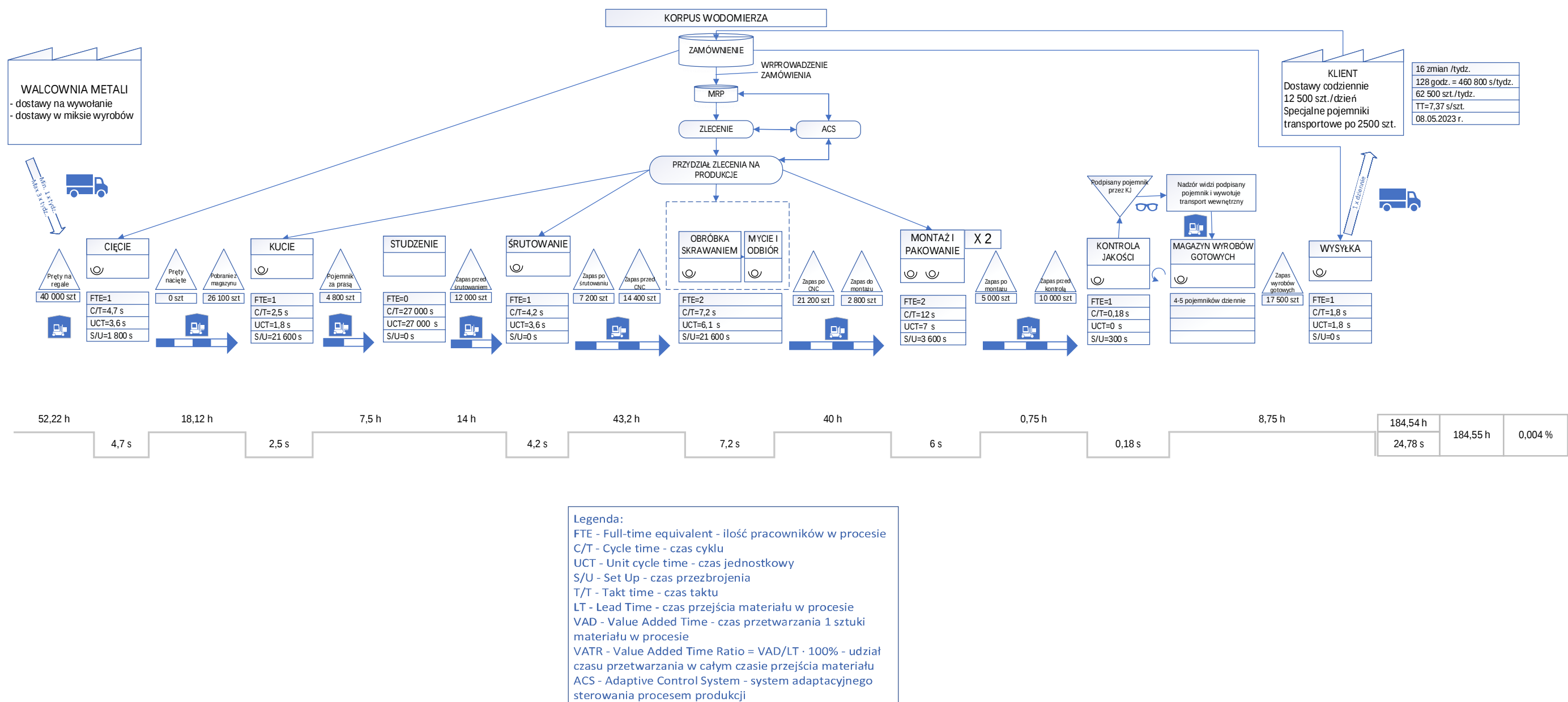
Rys. Z.29. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dostępu (AP – Access Point) - rozdyskrybuowanie sygnału WiFi - rzut magazynu, kuźni, okrawalni i oczyszczalni



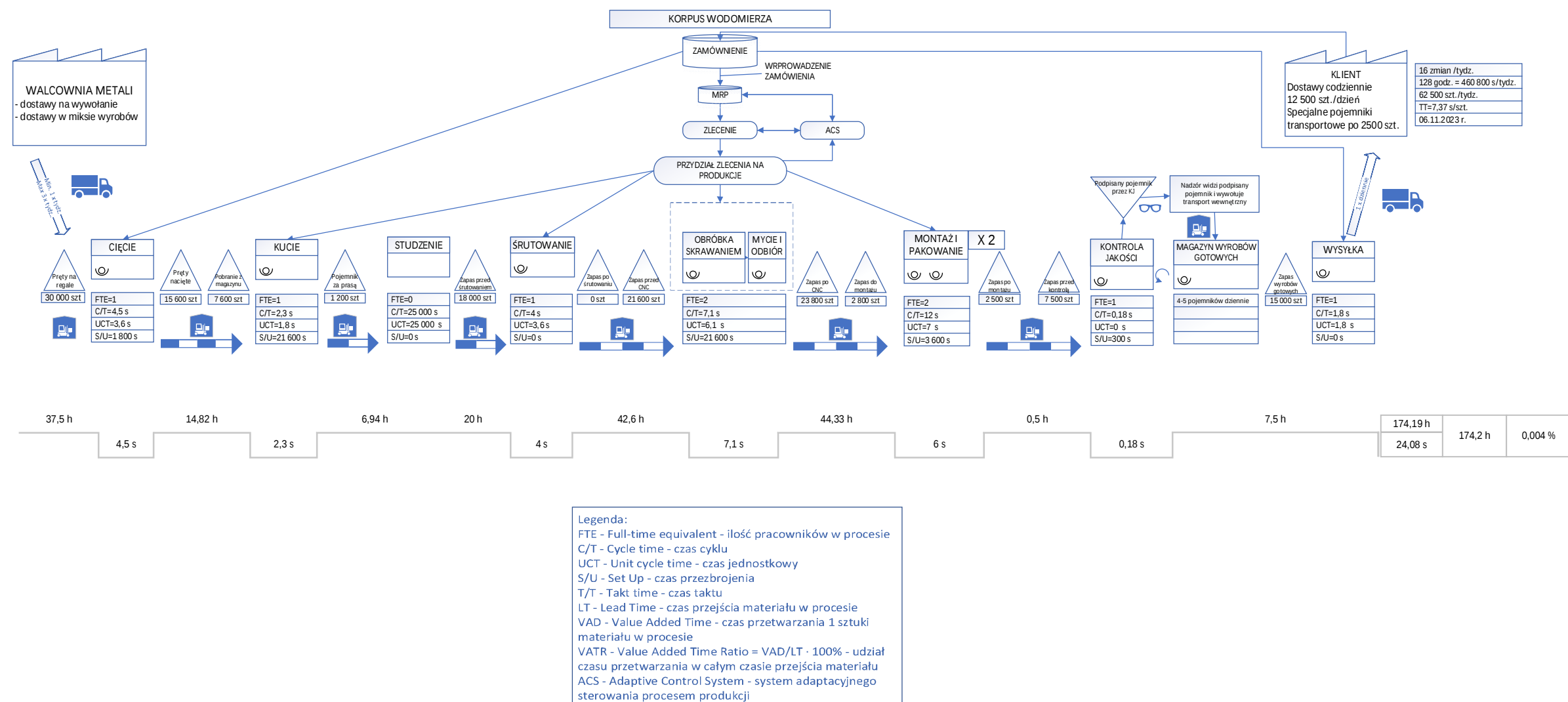
Rys. Z.30. Mapa procesu (VSM) – stan procesu przed wdrożeniem technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 1



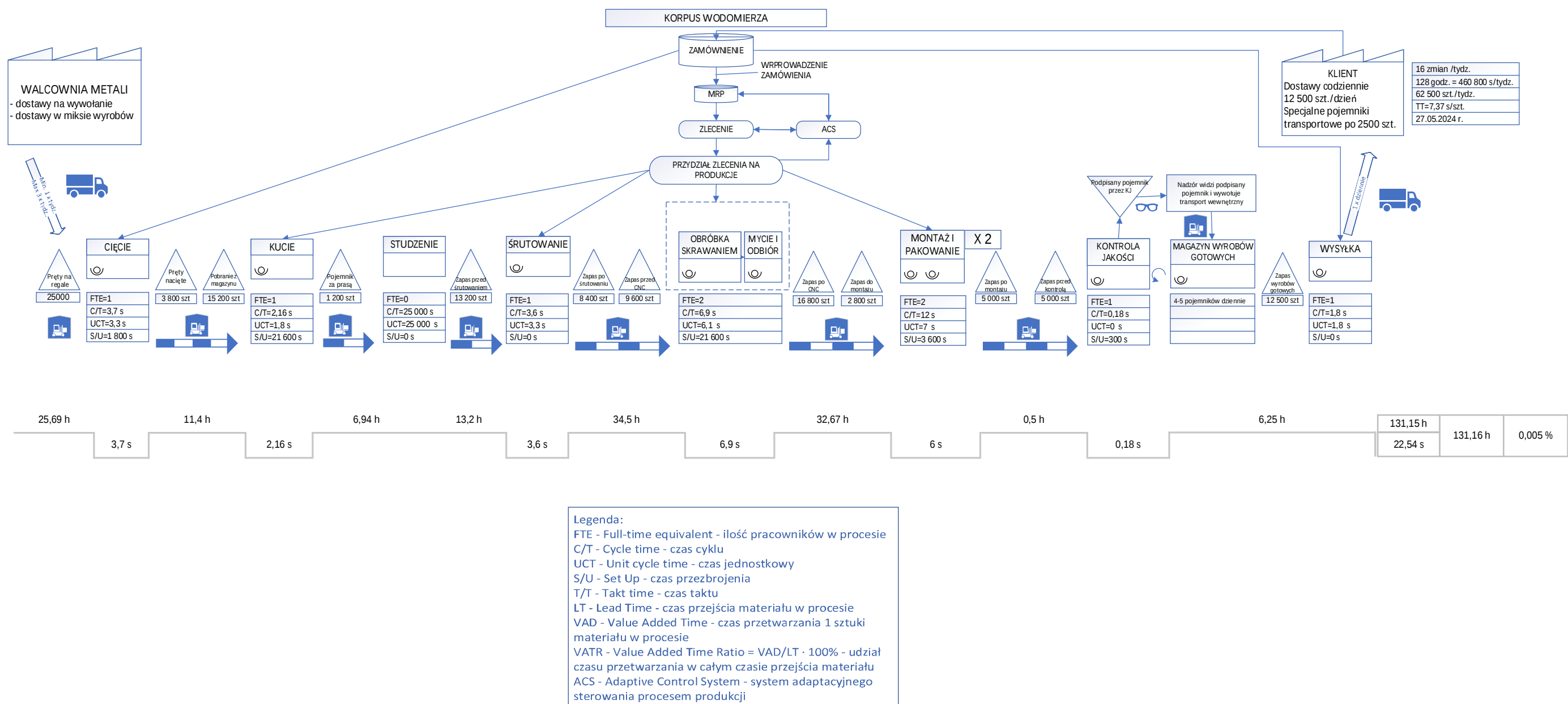
Rys. Z.31. Mapa procesu (VSM) – stan procesu przed wdrożeniem technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 2



Rys. Z.32. Mapa procesu (VSM) – stan procesu w trakcie wdrażania technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 3



Rys. Z.33. Mapa procesu (VSM) – stan procesu w trakcie wdrażania technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 4



Rys. Z.34. Mapa procesu (VSM) – stan procesu po wdrożeniu technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 5

## SPIS RYSUNKÓW

|                                                                                                                                                                            |                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Rys. 2.1 Schemat blokowy – Przemysł 5.0 .....                                                                                                                              | 19                                      |
| Rys. 2.2 Klasyfikacja metod oceny stanu procesu wytwarzania .....                                                                                                          | 26                                      |
| Rys. 2.3 Hierarchia systemów informatycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym. ....                                                                                        | 30                                      |
| Rys. 3.1 Ogólny schemat realizacji badań oraz wdrożenia przemysłowego .....                                                                                                | 43                                      |
| Rys. 3.2 Szczegółowy schemat badań własnych.....                                                                                                                           | 44                                      |
| Rys. 4.1 Widok ogólny na obrobione korpusy wodomierza mieszkaniowego .....                                                                                                 | 46                                      |
| Rys. 4.2 Przedkuvka po operacji cięcia.....                                                                                                                                | 47                                      |
| Rys. 4.3 Korpus wodomierza po operacji kucia matrycowego .....                                                                                                             | 47                                      |
| Rys. 4.4 Korpus wodomierza po operacji śrutowania.....                                                                                                                     | 48                                      |
| Rys. 4.5 Korpus wodomierza po operacji obróbki skrawaniem .....                                                                                                            | 48                                      |
| Rys. 4.6 Korpus wodomierza po operacji montażu płyty spiętrzającej, sitka i ośki wirnika....                                                                               | 48                                      |
| Rys. 4.7 Niski poziom jakości decyzji w procesie produkcji korpusu wodomierza – stan początkowy.....                                                                       | 49                                      |
| Rys. 4.8 Wyzwania i zagrożenia we wprowadzaniu zasad koncepcji Przemysłu 4.0 .....                                                                                         | 51                                      |
| Rys. 4.9 Schemat postępowania – etapy wdrażania systemu opartego na wskaźnikach KPI ..                                                                                     | 56                                      |
| Rys. 4.10 Struktura hierarchicznego modelu zarządzania wskaźnikami.....                                                                                                    | 61                                      |
| Rys. 4.11. Powiązanie wskaźników KPI z poszczególnymi obszarami oddziaływania na proces produkcyjny.....                                                                   | 62                                      |
| Rys. 4.12 Umiejscowienia badanych charakterystyk krytycznych w korpusie wodomierza po obróbce skrawaniem.....                                                              | <b>Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.</b> |
| Rys. 4.13 Umiejscowienia badanych charakterystyk krytycznych w korpusie wodomierza po montażu.....                                                                         | 67                                      |
| Rys. 4.14 Niski poziom jakości decyzji w procesie produkcji korpusu wodomierza – obszary podlegające usprawnieniu .....                                                    | 69                                      |
| Rys. 4.15 Proces produkcji korpusu wodomierza – stan docelowy.....                                                                                                         | 70                                      |
| Rys. 4.16. Mapa zależności wielkości jakościowych, procesowych, nastawnych dla operacji cięcia.....                                                                        | 72                                      |
| Rys. 4.17. Ścieżka pesymistyczna i optymistyczna przebiegu procesu (ze względu na spełnienie wymagań jakościowych).....                                                    | 74                                      |
| Rys. 5.1. Proces wymiany danych między systemem informatycznym FAS, a aplikacją ERP Veritum.....                                                                           | 84                                      |
| Rys. 5.2. Architektura rozwiązania - pobieranie i przetwarzanie sygnałów z kontrolerów maszyn produkcyjnych .....                                                          | 85                                      |
| Rys. 5.3. Widok obrabiarki transferowej GNUTTI 233 ze wskazaniem szafy elektrycznej .....                                                                                  | 86                                      |
| Rys. 5.4. Umiejscowienie centralnej modułowej jednostki przetwarzającej dane (typu Industry Control Device) w szafie elektrycznej obrabiarki transferowej GNUTTI 233 ..... | 87                                      |
| Rys. 5.5. Widok głównego punktu dystrybucyjnego (GPD) – po lewej widok z przodu, po prawej widok z tyłu .....                                                              | 87                                      |
| Rys. 5.6 Stanowisko z komputerem dotykowym AiO, czytnikiem kodów kreskowych i RFID... ..                                                                                   | 88                                      |
| Rys. 5.7 Zainstalowany ekran TV z dashboardem prezentującym przebieg procesu produkcji ..                                                                                  | 88                                      |
| Rys. 5.8. IDS1 – pośredni punkt dystrybucyjny – schemat .....                                                                                                              | 89                                      |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 5.9. Zrzut ekranu z systemu – interfejs do komunikacji z szafami narzędziowymi ISL i Sandvik .....                                      | 90  |
| Rys. 5.10 Zrzut ekranu z systemu – kokpit – interfejs startowy .....                                                                         | 90  |
| Rys. 5.11. System informatyczny – diagram kontekstu .....                                                                                    | 91  |
| Rys. 5.12. System informatyczny w środowisku FAS – diagram kontenerów .....                                                                  | 92  |
| Rys. 5.13. System informatyczny FAS – podział wewnętrzny .....                                                                               | 93  |
| Rys. 5.14. System informatyczny FAS – budowa typowego modułu .....                                                                           | 94  |
| Rys. 5.15. Zrzut ekranu z systemu – interfejs do przejścia do modułu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza ..... | 94  |
| Rys. 5.16 Założenia struktury danych - definiowanie cech jakościowych dla procesu produkcji .....                                            | 95  |
| Rys. 5.17. Zrzut ekranu modułu analitycznego – wykaz oprogramowanych narzędzi statystycznych .....                                           | 95  |
| Rys. 5.18. Założenia dla przeprowadzonej weryfikacji narzędzi i metod analiz danych .....                                                    | 96  |
| Rys. 5.19. Założenia dla oprogramowania reguł decyzyjnych w procesie produkcji korpusu wodomierza .....                                      | 97  |
| Rys. 5.20 Założenia dla przeprowadzonej weryfikacji reguł decyzyjnych .....                                                                  | 98  |
| Rys. 6.1 Zobrazowane wymagania klienta .....                                                                                                 | 101 |
| Rys. 6.2 Zobrazowana charakterystyka dostaw materiałów .....                                                                                 | 101 |
| Rys. 6.3 Wskazane miejsca i ilości zapasów w procesie produkcji .....                                                                        | 102 |
| Rys. 6.4 Przepływ informacji w procesie .....                                                                                                | 102 |
| Rys. 6.5 Wyniki analizy procesu produkcji korpusu wodomierza – stan przed wprowadzaniem zmian – analiza 1 .....                              | 103 |

## SPIS TABEL

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 2.1 Wybrane definicje sterowania produkcją .....                                                                                                                                | 14  |
| Tab. 4.1 Analiza SWOT przedsiębiorstwa FAS .....                                                                                                                                     | 53  |
| Tab. 4.2 Zestawienie KPI oraz odpowiadające im problemy produkcyjne w przedsiębiorstwie FAS.....                                                                                     | 57  |
| Tab. 4.3 Metryka opisu wskaźnika LT .....                                                                                                                                            | 58  |
| Tab. 4.4 Metryka opisu wskaźnika SC .....                                                                                                                                            | 59  |
| Tab. 4.5 Metryka opisu wskaźnika OEE .....                                                                                                                                           | 60  |
| Tab. 4.6 Pozyskiwane charakterystyki krytyczne korpusu wodomierza .....                                                                                                              | 65  |
| Tab. 4.7 Siła wpływu wielkości WJW, WNP, WPT oraz WPR na cechy krytyczne przedkuwki dla operacji cięcia.....                                                                         | 73  |
| Tab. 4.8 Liczba dostępnych maszyn dla realizacji poszczególnych operacji procesu technologicznego.....                                                                               | 73  |
| Tab. 4.9 Macierz wpływu pomiędzy parametrami procesu/maszyny w operacji cięcia a cechą krytyczną wstępniaka.....                                                                     | 76  |
| Tab. 4.10 Zbiór reguł decyzyjnych dla operacji cięcia.....                                                                                                                           | 76  |
| Tab. 4.11 Wyniki oceny skuteczności modelu decyzyjnego dla operacji technologicznej cięcia .....                                                                                     | 77  |
| Tab. 4.12 Wykaz narzędzi do monitorowania poszczególnych operacji technologicznych .....                                                                                             | 78  |
| Tab. 6.1 Zestawienie porównawcze parametrów realizacji procesu produkcji wodomierza ..                                                                                               | 103 |
| Tab. 6.2 Zmiana % parametrów procesowych związanych z przepływem materiału po zakończeniu procesu cyfryzacji .....                                                                   | 104 |
| Tab. 6.3 Poziom braków (SC) dla korpusów wodomierzy w 2023 r.....                                                                                                                    | 104 |
| Tab. 6.4 Poziom braków (SC) dla korpusów wodomierzy do maja 2024 r.....                                                                                                              | 105 |
| Tab. 6.5 Poziom efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń (OEE) dla procesu produkcji korpusów wodomierzy w 2023 r.....                                                           | 106 |
| Tab. 6.6 Poziom efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń (OEE) dla procesu produkcji korpusów wodomierzy do maja 2024 r.....                                                     | 106 |
| Tab. 6.7 Zmiana w p.p. poziomu efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń (OEE) dla procesu produkcji korpusów wodomierzy w miesiącach: I-V 2023 r. w stosunku do I-V 2024 r. .... | 107 |

## SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

|                                                                                                                                                                  |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Rys. Z.1. Przebieg procesu technologicznego produkcji korpusu wodomierza z wyszczególnieniem maszyn i urządzeń produkcyjnych .....                               | 113                                     |
| Tab. Z.2. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część I .....                  | 114                                     |
| Tab. Z.3. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część II .....                 | 115                                     |
| Tab. Z.4. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część III .....                | 116                                     |
| Tab. Z.5. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru efektywność/organizacja – część IV .....                 | 117                                     |
| Tab. Z.6. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część I .....                                   | 118                                     |
| Tab. Z.7. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część II .....                                  | 119                                     |
| Tab. Z.8. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część III .....                                 | 120                                     |
| Tab. Z.9. Arkusz wyjściowy dotyczący wskazania celów oraz odpowiadających im wskaźników KPI dla obszaru jakość – część IV .....                                  | 121                                     |
| Rys. Z.10. Szablon doskonalenia organizacyjnego X-matrix opracowany dla przedsiębiorstwa FAS.....                                                                | <b>Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.</b> |
| Tab. Z.11. Pozyskiwane parametry – operacja cięcia – piła ADIGE 1 .....                                                                                          | 123                                     |
| Tab. Z.12. Pozyskiwane parametry – operacja cięcia – piła ADIGE 2 .....                                                                                          | 123                                     |
| Tab. Z.13. Pozyskiwane parametry – operacja cięcia – piła ADIGE 3 .....                                                                                          | 123                                     |
| Tab. Z.14. Pozyskiwane parametry – kucie matrycowe – ME 250 .....                                                                                                | 123                                     |
| Tab. Z.15. Pozyskiwane parametry – kucie matrycowe – ME 350 .....                                                                                                | 124                                     |
| Tab. Z.16. Pozyskiwane parametry – śrutowanie – OWT .....                                                                                                        | 125                                     |
| Tab. Z.17. Pozyskiwane parametry – obróbka skrawaniem – G233 .....                                                                                               | 125                                     |
| Tab. Z.18. Pozyskiwane parametry – obróbka skrawaniem – G271 .....                                                                                               | 127                                     |
| Tab. Z.19. Pozyskiwane parametry – obróbka skrawaniem – G434 .....                                                                                               | 129                                     |
| Tab. Z.20. Pozyskiwane parametry – montaż .....                                                                                                                  | 132                                     |
| Rys. Z.21. Opracowany schemat struktury systemu komputerowego .....                                                                                              | 133                                     |
| Rys. Z.22. Plan hal FAS z oznaczonymi maszynami i urządzeniami produkcyjnymi biorącymi udział w badaniach – rzut magazynu, kuźni, okrawalni i oczyszczalni ..... | 134                                     |
| Rys. Z.23. Plan hal FAS z oznaczonymi maszynami i urządzeniami produkcyjnymi biorącymi udział w badaniach – rzut hali obróbki mechanicznej i montażu .....       | 135                                     |
| Rys. Z.24. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dystrybucji oraz przebiegiem linii światłowodowych .....                                                         | 136                                     |
| Rys. Z.25. Plan hal FAS z naniesionymi punktami wizualizacji i dostępu dla pracowników produkcji - rzut magazynu, kuźni, okrawalni i oczyszczalni ..             | <b>Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.</b> |
| Rys. Z.26. Plan hal FAS z naniesionymi punktami wizualizacji i dostępu dla pracowników produkcji - rzut hali obróbki mechanicznej i montażu .....                | 138                                     |

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. Z.27. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dostępu (AP – Access Point) - rozdystrybuowanie sygnału WiFi – rzut części biurowej.....                                   | 139 |
| Rys. Z.28. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dostępu (AP – Access Point) - rozdystrybuowanie sygnału WiFi - rzut hali obróbki mechanicznej i montażu .....              | 140 |
| Rys. Z.29. Plan hal FAS z naniesionymi punktami dostępu (AP – Access Point) - rozdystrybuowanie sygnału WiFi - rzut magazynu, kuźni, okrawalni i oczyszczalni.....         | 141 |
| Rys. Z.30. Mapa procesu (VSM) – stan procesu przed wdrożeniem technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 1 .....    | 142 |
| Rys. Z.31. Mapa procesu (VSM) – stan procesu przed wdrożeniem technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 2 .....    | 143 |
| Rys. Z.32. Mapa procesu (VSM) – stan procesu w trakcie wdrażania technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 3 ..... | 144 |
| Rys. Z.33. Mapa procesu (VSM) – stan procesu w trakcie wdrażania technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 4 ..... | 145 |
| Rys. Z.34. Mapa procesu (VSM) – stan procesu po wdrożeniu technologii cyfrowych do adaptacyjnego sterowanie procesem produkcji korpusu wodomierza – analiza 5 .....        | 146 |

## BIBLIOGRAFIA

- Adams, M., Homan, P., Lescop, C., Gonzalez, S., Dickson, M., & Hutley, D. (2022). *The TOGAF® Standard, 10th Edition Introduction and Core Concepts*. Van Haren Publishing.
- Andersen, B. (1999). Industrial benchmarking for competitive advantage. *Human Systems Management*, 18(3–4), 287–296. <https://doi.org/10.3233/hsm-1999-183-413>
- APICS. (2024). *Production control*. APICS Dictionary mobile app. wersja 3.0; American Production and Inventory Control Society.
- Arora, K. C. (2004). *Production and operation management*. Laxami Publication.
- Asadov, R. (2023). Intelligent Process Automation: Streamlining Operations and Enhancing Efficiency in Management. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4495188>
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6(November 2022), 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
- Berente, N., Gu, B., Recker, J., & Santhanam, R. (2021). *SPECIAL ISSUE: MANAGING AI MANAGING ARTIFICIAL INTELLIGENCE* 1. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2021/16274>
- Bernat, T., & Duda, J. (2023). Business Impacts of COVID-19: International Business, Crisis Management, and the Global Economy. *W Business Impacts of COVID-19: International Business, Crisis Management, and the Global Economy*. <https://doi.org/10.4324/9781003368687>
- Berruti, F., Nixo, G., Taglioni, G., & Whiteman, R. (2017). Intelligent process automation: The engine at the core of the next-generation operating model. *Digital McKinsey*, March, 1–9. [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business\\_functions/mckinsey\\_digital/our\\_insights/intelligent\\_process\\_automation\\_the\\_engine\\_at\\_the\\_core\\_of\\_the\\_next\\_generation\\_operating\\_model/intelligent-process-automation.pdf?shouldIndex=false](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business_functions/mckinsey_digital/our_insights/intelligent_process_automation_the_engine_at_the_core_of_the_next_generation_operating_model/intelligent-process-automation.pdf?shouldIndex=false)
- Bertagnolli, F. (2022). Lean Management: Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy. *W Lean Management: Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-36087-0>
- Bigliardi, B., Bottani, E., & Casella, G. (2020). Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: A bibliographic analysis. *Procedia Manufacturing*, 42, 322–326. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.086>
- Biller, B., & Biller, S. (2023). Implementing Digital Twins That Learn: AI and Simulation Are at the Core. *Machines*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/machines11040425>

- Bingham, C. B., & Eisenhardt, K. M. (2008). Position, leverage and opportunity: a typology of strategic logics linking resources with competitive advantage. *Managerial and Decision Economics*, 29(2–3), 251–256.
- Bocewicz, G., Szwarc, E., Wikarek, J., Nielsen, P., & Banaszak, Z. (2021). A competency-driven staff assignment approach to improving employee scheduling robustness. *Eksploracja i Niezawodność*, 23(1), 117–131. <https://doi.org/10.17531/EIN.2021.1.13>
- Bock, R. H., & Holstein, W. K. (1963). *PRODUCTION PLANNING AND CONTROL*. CHARLES E. MERRILL BOOKS.
- Borkowski, S., & Ulewicz, R. (2008). *Zarządzanie produkcją: systemy produkcyjne*. Oficyna Wydawnicza Humanitas. <https://www.researchgate.net/publication/309722383>
- Buer, S. V., Strandhagen, J. W., Semini, M., & Strandhagen, J. O. (2021). The digitalization of manufacturing: investigating the impact of production environment and company size. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 621–645. <https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2019-0174>
- Burduk, A., Lapczynska, D., & Popiel, P. (2021). Simulation modeling in production effectiveness improvement - case study. W *Management and Production Engineering Review* (T. 12, Numer 2, s. 75–85). Polska Akademia Nauk. <https://doi.org/10.24425/mper.2021.137680>
- Cambridge Business English Dictionary. (2024). *Production control*. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/production-control>.
- Cerquitelli, T., Pagliari, D. J., Calimera, A., Bottaccioli, L., Patti, E., Acquaviva, A., & Poncino, M. (2021). Manufacturing as a Data-Driven Practice: Methodologies, Technologies, and Tools. *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 399–422. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3056006>
- Chakraborti, T., Isahagian, V., Khalaf, R., Khazaeni, Y., Muthusamy, V., Rizk, Y., & Unuvar, M. (2020). From Robotic Process Automation to Intelligent Process Automation. *Business Process Management: Blockchain and Robotic Process Automation Forum*, 215–228.
- Chakroun, A., Hani, Y., Elmhamedi, A., & Masmoudi, F. (2023). A proposed integrated manufacturing system of a workshop producing brass accessories in the context of industry 4.0. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(3–4), 2017–2033. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10057-x>
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2017). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>
- Chruściński, M., Szkudelski, S., Borowski, J., Meller, A., & Suszyński, M. (2021). New copper alloys used to make products intended for contact with drinking water. *Materials*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/ma14216301>

- Cios, K. J., Pedrycz, W., Swiniarski, R. W., & Kurgan, L. A. (2007). Data mining: A knowledge discovery approach. W *Data Mining: A Knowledge Discovery Approach*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36795-8>
- Cios, K., Pedrycz, W., & Swiniarski, R. (1998). Data mining: Methods for knowledge discovery. W *Computers & Mathematics with Applications* (T. 37, Numer 10). Springer Science+Business Media. [https://doi.org/10.1016/s0898-1221\(99\)90357-7](https://doi.org/10.1016/s0898-1221(99)90357-7)
- Corallo, A., Lazoi, M., Lezzi, M., & Pontrandolfo, P. (2023). Cybersecurity Challenges for Manufacturing Systems 4.0: Assessment of the Business Impact Level. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(11), 3745–3765. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3084687>
- Corr, L., & Stagnitto, J. (2011). *Agile Data Warehouse Design: Collaborative Dimensional Modeling, from Whiteboard to Star Schema*. <https://books.google.com/books?id=TRWFmnv8jP0C&pgis=1>
- Cosgun, A. E. (2023). Digital twin and human digital twin for practical implementation in Industry 5.0. W *Global Perspectives on Robotics and Autonomous Systems: Development and Applications* (s. 168–183). <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7791-5.ch007>
- Cottrino, A., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C. (2020). Industry 4.0 roadmap: Implementation for small and medium-sized enterprises. W *Applied Sciences (Switzerland)* (T. 10, Numer 23, s. 1–17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10238566>
- Cugno, M., Castagnoli, R., & Büchi, G. (2021). Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. *Technological Forecasting and Social Change*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120756>
- Curry, E., Auer, S., Berre, A. J., Metzger, A., Perez, M. S., & Zillner, S. (2022). Technologies and Applications for Big Data Value. W *Technologies and Applications for Big Data Value*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78307-5>
- Deniša, M., Ude, A., Simonič, M., Kaarlela, T., Pitkäaho, T., Pieskä, S., Arents, J., Judvaitis, J., Ozols, K., Raj, L., Czmerk, A., Dianatfar, M., Latokartano, J., Schmidt, P. A., Mauersberger, A., Singer, A., Arnarson, H., Shu, B., Dimosthenopoulos, D., ... Lanz, M. (2023). Technology Modules Providing Solutions for Agile Manufacturing. *Machines*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/machines11090877>
- Denkena, B., Dittrich, M. A., & Wilmsmeier, S. (2019). Automated production data feedback for adaptive work planning and production control. *Procedia Manufacturing*, 28, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.004>
- Denkena, B., & Morke, T. (2017). Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle. W B. Denkena & T. Morke (Red.), *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle*. <https://doi.org/10.1016/c2016-0-00374-1>

- Desfray, Philippe and Raymond, G. (2014). *Modeling EA: Practical guide using UML and BPMN*.
- Di Tria, F., Lefons, E., & Tangorra, F. (2017). Evaluation of data warehouse design methodologies in the context of Big data. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10440 LNCS, 3–18. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64283-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64283-3_1)
- D’Orazio, L., Messina, R., & Schiraldi, M. M. (2020). Industry 4.0 and world class manufacturing integration: 100 technologies for a WCM-I4.0 matrix. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(14). <https://doi.org/10.3390/app10144942>
- Dornfeld, D. (2013). Green manufacturing: Fundamentals and applications. W *Green Manufacturing: Fundamentals and Applications* (T. 9781441960). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6016-0>
- Dossou, P. E., & Nshokano, C. (2024). Framework for Implementing Digital Twin as an Industry 5.0 Concept to Increase the SME Performance. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 590–600. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38165-2\\_69](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38165-2_69)
- Duggal, A. S., Malik, P. K., Gehlot, A., Singh, R., Gaba, G. S., Masud, M., & Al-Amri, J. F. (2022). A sequential roadmap to Industry 6.0: Exploring future manufacturing trends. *IET Communications*, 16(5), 521–531. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12284>
- Emmert-Streib, F., Tripathi, S., & Dehmer, M. (2023). Analyzing the Scholarly Literature of Digital Twin Research: Trends, Topics and Structure. *IEEE Access*, 11, 69649–69666. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3290488>
- Encyklopedia PWN. (2024). *Sterowanie*. <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/sterowanie;3979661.html>.
- Esteso, A., Peidro, D., Mula, J., & Díaz-Madroñero, M. (2023). Reinforcement learning applied to production planning and control. W *International Journal of Production Research* (T. 61, Numer 16, s. 5772–5789). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2104180>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Giordani da Silveira, W., Pinheiro de Lima, E., Deschamps, F., & Gouvea da Costa, S. E. (2018). Identification of guidelines for Hoshin Kanri initiatives. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 67(1), 85–110. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2016-0071>
- Głowacka-Fertsch, D., & Fertsch, M. (2004). *Zarządzanie Produkcją*. Wyższa Szkoła Logistyki.
- Gola, A. (2021). Design and management of manufacturing systems. W *Applied Sciences (Switzerland)* (T. 11, Numer 5, s. 1–3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11052216>

- González Rodríguez, G., Gonzalez-Cava, J. M., & Méndez Pérez, J. A. (2020). An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1257–1273. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01510-y>
- Hamrol, A. (2022). *Zarządzanie i inżynieria jakości. Ze spojrzeniem w rzeczywistość 4.0*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques*. The Morgan Kaufmann Series. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61819-5>
- Harrison, A. (1998). Manufacturing strategy and the concept of world class manufacturing. *International Journal of Operations and Production Management*, 18(4), 397–408. <https://doi.org/10.1108/01443579810199775>
- Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Khilji, I. A., Hashmi, M. F., & Saffe, S. N. binti M. (2022). Artificial intelligence techniques for implementation of intelligent machining. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1947–1955. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.277>
- Hellsten, U., & Klefsjo, B. (2000). TQM as a management system consisting of values, techniques and tools. *The TQM Magazine*, 238–244. <http://www.emerald-library.com>
- Hendry, L. C. (1998). Applying world class manufacturing to make-to-order companies: Problems and solutions. *International Journal of Operations and Production Management*, 18(11), 1086–1100. <https://doi.org/10.1108/01443579810231679>
- <https://www.fa-swarzedz.com.pl/korpusy-wodomierzy-i-cieplomierzy/>. (2024, lipiec 20).
- <https://www.oracle.com/pl/cloud/hyperautomation/>. (2024).
- Huawei, T. (2022). Does gross domestic product, inflation, total investment, and exchanges rate matter in natural resources commodity prices volatility. *Resources Policy*, 79, 103013. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2022.103013>
- Ishaq Bhatti, M., & Awan, H. M. (2014). The key performance indicators (KPIs) and their impact on overall organizational performance. *Quality and Quantity*, 48(6), 3127–3143. <https://doi.org/10.1007/s11135-013-9945-y>
- ISO 22400-1:2014(E). (2014). *Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management, Part 1: Overview, concepts and terminology*. [www.iso.org](http://www.iso.org)
- ISO 22400-2:2014(E). (2014). *Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management, Part 2: Definitions and descriptions*.
- Jahangirian, M., Taylor, S. J. E., Young, T., & Robinson, S. (2017). Key performance indicators for successful simulation projects ga. *Journal of the Operational Research Society*, 68(7), 747–765. <https://doi.org/10.1057/jors.2016.1>

- Jasiulewicz-Kaczmarek, M. (2024). Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing. *Applied Sciences*, 14(16), 7360. <https://doi.org/10.3390/app14167360>
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., & Saniuk, A. (2018). How to make maintenance processes more efficient using lean tools? *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 605, 9–20. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60828-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60828-0_2)
- Jiang, Y., Li, X., Luo, H., Yin, S., & Kaynak, O. (2022). Quo vadis artificial intelligence? W *Discover Artificial Intelligence* (T. 2, Numer 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s44163-022-00022-8>
- Kang, N., Zhao, C., Li, J., & Horst, J. A. (2016). A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems. *International Journal of Production Research*, 54(21), 6333–6350. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1136082>
- Kantardzic, M. (2011). *Data Mining – concepts, models, methods and algorithms*. Wiley.
- Kaplan, R. S. (2010). *Conceptual Foundations of the Balanced Scorecard*.
- Kardas, J. S., & Wójcik-Augustyniak, M. (Red.). (2017). *ZARZĄDZANIE W PRZEDSIĘBIORSTWIE: Środowisko, procesy, systemy, zasoby*. DIFIN.
- Kayode Olajiga, O., Chigozie Ani, E., Andrew Olu-lawal, K., Jose Portillo Montero, D., Kehinde Adeleke, A., Researcher, I., & Author, C. (2024). INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS IN MANUFACTURING: CURRENT STATE AND FUTURE PERSPECTIVES. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 750–759. <https://doi.org/10.51594/estj/v5i3.870>
- Khan, F., Kumar, R. L., Kadry, S., & Nam, Y. (2021). The future of software engineering: Visions of 2025 and beyond. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(4), 3443–3450. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp3443-3450>
- Khang A, Abdullayev V, Hahanov V, & Shah V. (2024). *Advanced IoT Technologies and Applications in the Industry 4.0 Digital Economy*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003434269>
- Kishorre Annanth, V., Abinash, M., & Rao, L. B. (2021). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of siemens industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1969(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012019>
- Klonowski, Z. J. . (2004). *Systemy informatyczne zarządzania przedsiębiorstwem : modele rozwoju i właściwości funkcjonalne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Koumas, M., Dossou, P.-E., & Didier, J.-Y. (2021). Digital Transformation of Small and Medium Sized Enterprises Production Manufacturing. *Journal of Software Engineering and Applications*, 14(12), 607–630. <https://doi.org/10.4236/jsea.2021.1412036>
- KPMG, & Microsoft. (2022). *Monitor Transformacji Cyfrowej Biznesu*.

- Król, D., Skowroński, J., Zaręba, M., & Bartecki, K. (2020). Key Performance Indicators as a Tool for Production Process Assessment – Part II: Industrial Research. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 24(3), 19–28. [https://doi.org/10.14313/par\\_237/19](https://doi.org/10.14313/par_237/19)
- Krupski, R. (2014). Zasoby niematerialne jako główny składnik strategii przedsiębiorstwa działającego w turbulentnym, nieprzewidywalnym otoczeniu. *Organizacja i Kierowanie*, 1(159), 87–98.
- Kucharczyk, A., & Kardas, E. (2018). Ocena potencjału wybranego przedsięwzięcia za pomocą analizy SWOT/TOWS The assessment of potential of selected enterprise using SWOT/TOWS analysis. *ARCHIVES OF ENGINEERING KNOWLEDGE*, 3(1), 3–7. [www.qpij.pl](http://www.qpij.pl)
- Kumar, A., Kumar, P., Liu, Y., & Kumar, R. (2024). *Handbook of Intelligent and Sustainable Manufacturing: Tools, Principles, and Strategies*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Larose, D. T. (2008). *Metody i modele eksploracji danych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Legutko, S. (2004). *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. <https://books.google.com/books?id=SiSwo0scDb8C&pgis=1>
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 279–295. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>
- Leong, W. D., Lam, H. L., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Tan, C. P., & Ponnambalam, S. G. (2019). Lean and Green Manufacturing—a Review on its Applications and Impacts. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 3(1), 5–23. <https://doi.org/10.1007/s41660-019-00082-x>
- Leonne, W., Seruffo, M., & Silveira, A. (2024). Proposal of a multi-criteria decision-making model for the implementation of a supervisory system for Industry 4.0. *International Journal of Management and Decision Making*, 23(2), 228–251. <https://doi.org/10.1504/IJMDM.2024.137015>
- Lezzi, M., Lazoi, M., & Corallo, A. (2018). Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. W *Computers in Industry* (T. 103, s. 97–110). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.09.004>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. W *International Journal of Production Research* (T. 55, Numer 12, s. 3609–3629). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56(July), 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>

- Łapuńska, I., Marek-Kołodziej, K., & i in. (2016). Niezawodność w strukturze sterowania realizacją projektów produkcyjnych. W *Konferencja Przemysł 4.0 a Zarządzanie i Inżynieria Produkcji*.
- Mantravadi, S., & Møller, C. (2019). An overview of next-generation manufacturing execution systems: How important is MES for industry 4.0? *Procedia Manufacturing*, 30, 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.083>
- McKay, K. N., & Wiers, V. C. S. (2004). *Practical production control: a survival guide for planners and schedulers*. J. Ross Publishing.
- McKinsey&Company. (2015). *Industry 4.0 How to navigate digitization of the manufacturing sector*.
- Meindl, B., Ayala, N. F., Mendonça, J., & Frank, A. G. (2021). The four smarts of Industry 4.0: Evolution of ten years of research and future perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120784. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2021.120784>
- Melander, A., Löfving, M., Andersson, D., Elgh, F., & Thulin, M. (2016). Introducing the Hoshin Kanri strategic management system in manufacturing SMEs. *Management Decision*, 54(10), 2507–2523. <https://doi.org/10.1108/MD-03-2016-0148>
- Meller, A., Piechowski, M., & Cep, R. (2022). Opracowanie modelu hierarchicznej struktury wskaźników wspomagającego proces zarządzania produkcją. W *Innowacje w elektronice, informatyce i inżynierii produkcji*, t. 3 (s. 123–140). Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.
- Meller, A., Piechowski, M., Legutko, S., & Kędziora, H. (2023). ZNACZNIKI NIEZGODNOŚCI JAKO ELEMENT DOSKONALENIA PROCESU PRODUKCJI KORPUSÓW WODOMIERZA. W *Innowacje w elektronice, informatyce i inżynierii produkcji. T. 4 / red. Krzysztof Bzdyra* (s. 65–78). Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.
- Meller, A., Suszyński, M., & Legutko, S. (2021). The approach of SMEs from the metal industry to the implementation of the Industry 4.0 Concept, using the example of Central and Eastern Europe. *8th INTERNATIONAL CONFERENCE OF EXPERIMENTAL AND CALCULATION METHODS*, 11–17.
- Meller, A., Suszyński, M., Legutko, S., Trączyński, M., & Cernohlavek, V. (2023). Studies on a Robotised Process for Forging Steel Synchronizer Rings in the Context of Forging Tool Life. *Manufacturing Technology*, 23(1), 88–98. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.002>
- Merriam-Webster. (2024). *Production control*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/production%20control>.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>

- Moreira, S., Mamede, H. S., & Santos, A. (2023). Process automation using RPA-A literature review. *Procedia Computer Science*, 219, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.287>
- Mróz, A., Szymański, M., Koch, P., Pawlicki, M., Meller, A., & Przekop, R. E. (2024). The Influence of Surface Texture of Elements Made of PA6-Based Composites on Anti-Graffiti Effect of Paint Coating. *Materials*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ma17091951>
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010247>
- Mykhnenko, V., Delahaye, E., & Mehdi, N. (2022). Understanding forced internal displacement in Ukraine: insights and lessons for today's crises. *Oxford Review of Economic Policy*, 38(3), 699–716. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grac020>
- Naqshbandi, M. M., & Jasimuddin, S. M. (2022). Journal of Innovation. *Journal of Innovation & Knowledge*, 7(2), 100167. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100167>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Ng, K. K. H., Chen, C. H., Lee, C. K. M., Jiao, J. (Roger), & Yang, Z. X. (2021). A systematic literature review on intelligent automation: Aligning concepts from theory, practice, and future perspectives. *Advanced Engineering Informatics*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101246>
- Nielsen, I. E., Piyatilake, A., Thibbotuwawa, A., Silva, M. M. De, Bocewicz, G., & Banaszak, Z. A. (2023). Benefits Realization of Robotic Process Automation (RPA) Initiatives in Supply Chains. *IEEE Access*, 11, 37623–37636. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3266293>
- Nikishechkin, P. A., Chervonnova, N. Y., & Nikich, A. N. (2020). An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044065>
- Oakland, J. S. (2007). *Total Organizational Excellence*. Routledge.
- O'Donnell, P. D. (1952). *Production control*. Prentice-Hall.
- Oussous, A., Benjelloun, F. Z., Ait Lahcen, A., & Belfkih, S. (2018). Big Data technologies: A survey. W *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* (T. 30, Numer 4, s. 431–448). King Saud bin Abdulaziz University. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.06.001>
- Pająk, E. (2006). *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Pająk, E., & Trojanowska, J. (2012). Planowanie i sterowanie produkcją wieloasortymentową. *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Pallagani, V., Chandra Muppasani, B., Roy, K., Fabiano, F., Loreggia, A., Murugesan, K., Srivastava, B., Rossi, F., Horesh, L., & Sheth, A. (2024). *On the Prospects of Incorporating Large Language Models (LLMs) in Automated Planning and Scheduling (APS)*. <https://ai4society.github.io/LLM-Planning-Viz/>,
- Panzer, M., & Gronau, N. (2023). Designing an adaptive and deep learning based control framework for modular production systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02249-3>
- Parmenter, David. (2019). *Key performance indicators : developing, implementing, and using winning KPIs*. Wiley.
- PARP, & Chaber P. (2021). *Monitoring trendów w innowacyjności – Raport 10*.
- Paul, I. D., Bhole, G. P., & Chaudhari, J. R. (2014). A Review on Green Manufacturing: It's Important, Methodology and its Application. *Procedia Materials Science*, 6, 1644–1649. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.149>
- Perrault, R., & Clark, J. (2024). *Artificial Intelligence Index Report 2024*. [https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2024/04/HAI\\_AI-Index-Report-2024.pdf](https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2024/04/HAI_AI-Index-Report-2024.pdf)
- Piechowski, M., Szafer, P., Wyczolkowski, R., & Gladysiak, V. (2018). Concept of the FMEA method-based model supporting proactive and preventive maintenance activities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 400(6). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/400/6/062023>
- Pizoń, J., & Gola, A. (2023). The Meaning and Directions of Development of Personalized Production in the Era of Industry 4.0 and Industry 5.0. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 1–13. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09360-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09360-9_1)
- PN-EN 15341:2019-12. (2019). *Obsługiwanie. Kluczowe wskaźniki efektywności obsługiwaniania*. [www.pkn.pl](http://www.pkn.pl).
- POLSKA AGENCJA ROZWOJU PRZEDSIĘBIORCZOŚCI. (2021). *Raport z badania Global Entrepreneurship Monitor Polska 2021*.
- Prajogo, D. I., & Sohal, A. S. (2006). The relationship between organization strategy, total quality management (TQM), and organization performance - The mediating role of TQM. *European Journal of Operational Research*, 168(1), 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.03.033>
- Reuter, C., Brambring, F., Hempel, T., & Kopp, P. (2017). Benefit Oriented Production Data Acquisition for the Production Planning and Control. *Procedia CIRP*, 61, 487–492. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.142>

- Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic Process Automation and Artificial Intelligence in Industry 4.0 - A Literature review. *Procedia Computer Science*, 181, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>
- Rogalewicz, M., Piłacińska, M., & Kujawińska, A. (2012). SELECTION OF DATA MINING METHOD FOR MULTIDIMENSIONAL EVALUATION OF THE MANUFACTURING PROCESS STATE. *Management and Production Engineering Review*, 3(2), 27–35. <https://doi.org/10.2478/v10270-012-0013-1>
- Rojek, I., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Piechowski, M., & Mikołajewski, D. (2023). An Artificial Intelligence Approach for Improving Maintenance to Supervise Machine Failures and Support Their Repair. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/app13084971>
- Rožanec, J. M., Lu, J., Rupnik, J., Škrjanc, M., Mladenović, D., Fortuna, B., Zheng, X., & Kiritsis, D. (2022). Actionable cognitive twins for decision making in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 60(2), 452–478. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2002967>
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach, Global Edition*. Pearson Education.
- Rutkowski, L. (2012). Metody i techniki sztucznej inteligencji. W *Informatyka - zastosowania*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Siderska, J. (2020). Robotic Process Automation — a driver of digital transformation? *Engineering Management in Production and Services*, 12.
- Siderska, J., Aunimo, L., Süße, T., von Stamm, J., Kedziora, D., & Aini, S. N. B. M. (2023). Towards Intelligent Automation (IA): literature review on the evolution of Robotic Process Automation (RPA), its challenges, and future trends. *Engineering Management in Production and Services*, 15(4), 90–103. <https://doi.org/10.2478/emj-2023-0030>
- Stadnicka, D. (2021). Lean manufacturing: kompendium wiedzy: monografia. W *Lean manufacturing: kompendium wiedzy: monografia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- Stapenhurst, T. (2009). *The Benchmarking Book: A How-to-Guide to Best Practice for Managers and Practitioners*. Routledge. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780080943329>
- Sundaram, S., & Zeid, A. (2023). Artificial Intelligence-Based Smart Quality Inspection for Manufacturing. *Micromachines*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/mi14030570>
- Suszyński, M., Meller, A., Peta, K., Trączyński, M., Butlewski, M., & Klimenda, F. (2022). Application of Neural Networks for Water Meter Body Assembly Process Optimization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/app122111160>
- Śliwczyński, B. (2008). *Planowanie logistyczne*. Instytut Logistyki i Magazynowania.

- Thiede, S., Juraschek, M., & Herrmann, C. (2016). Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. *Procedia CIRP*, 54, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.098>
- Thürer, M., Maschek, T., Fredendall, L., Gianiodis, P., Stevenson, M., & Deuse, J. (2019). On the integration of manufacturing strategy: deconstructing Hoshin Kanri. *Management Research Review*, 42(3), 412–426. <https://doi.org/10.1108/MRR-04-2018-0178>
- Trauer, J., Pfingstl, S., Finsterer, M., & Zimmermann, M. (2021). Improving production efficiency with a digital twin based on anomaly detection. *Sustainability (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/su131810155>
- Tuptuk, N., & Hailes, S. (2018). Security of smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.007>
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. (2019). *DIGITAL ECONOMY REPORT 2019: value creation and capture - implications for developing countries*.
- Usuga Cadavid, J. P., Lamouri, S., Grabot, B., Pellerin, R., & Fortin, A. (2020). Machine learning applied in production planning and control: a state-of-the-art in the era of industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1531–1558. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01531-7>
- van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *W Information and Software Technology* (T. 151). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>
- Vinodh, S. (2023). *Lean Manufacturing; Fundamentals, Tools, Approaches, and Industry 4.0 Integration*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Volz, F., Sutschet, G., Stojanovic, L., & Usländer, T. (2023). On the Role of Digital Twins in Data Spaces. *Sensors*, 23(17). <https://doi.org/10.3390/s23177601>
- Wang, K., Cai, C., Lin, J., Tong, X., Tao, Z., Yu, H., Fang, Q., & Ye, Y. (2023). A novel strategy of regional microstructure design in manufacturing. *Materials Letters*, 333, 133644. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.133644>
- Warwick, K. (2013). *Artificial Intelligence: The Basics*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203802878>
- Wit de, B., & Meyer, R. (2007). *Synteza strategii*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Wohlers, B., Dziwok, S., Pasic, F., Lipsmeier, A., & Becker, M. (2020). Monitoring and control of production processes based on key performance indicators for mechatronic systems. *International Journal of Production Economics*, 220, 107452. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2019.07.025>

- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Yusupbekov, N., Adilov, F., Ivanyan, A., & Abdurasulov, F. (2023). Application of digital twin technologies in mining industrial branch. *E3S Web of Conferences*, 414. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341705016>
- Zawadzki, P., & Zywicki, K. (2016). Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 concept. *Management and Production Engineering Review*, 7(3), 105–112. <https://doi.org/10.1515/mper-2016-0030>
- Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *W Heliyon* (T. 9, Numer 4). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>