



*mgr inż. Jakub Pizoń*

# Poprawa efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych

*Promotor:*

*prof. dr hab. inż. Jerzy Lipski  
Politechnika Lubelska*

*Promotor pomocniczy:*

*dr inż. Tomasz Cieplak  
Politechnika Lubelska*

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Serdeczne podziękowania składam  
Panu Promotorowi  
prof. dr. hab. inż. Jerzemu Lipskiemu  
za wszechstronną pomoc, opiekę naukową,  
czas poświęcony na dyskusje, za wsparcie i wyrozumiałość*

*Pragnę również podziękować  
Panu Promotorowi pomocniczemu  
dr. Tomaszowi Cieplakowi  
za okazaną pomoc i cenne wskazówki*

*Dziękuję również wszystkim osobom,  
z którymi współpracowałem w czasie realizacji niniejszej pracy za okazaną pomoc  
oraz mojej Rodzinie i Przyjaciołom za wsparcie i cierpliwość*

# POLITECHNIKA LUBELSKA

## WYDZIAŁ MECHANICZNY

### ROZPRAWA DOKTORSKA



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 Lublin

mgr inż. Jakub Pizoń

# Poprawa efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych

Promotor:

prof. dr hab. inż. Jerzy Lipski  
Politechnika Lubelska

promotor pomocniczy:

dr Tomasz Cieplak  
Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Lublin 2019



# Spis treści

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| STRESZCZENIE .....                                                      | 7  |
| ABSTRACT .....                                                          | 8  |
| Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów .....                             | 9  |
| 1. Wstęp .....                                                          | 11 |
| 1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu .....                                 | 12 |
| 1.2. Cel, tezy i zakres pracy .....                                     | 13 |
| 2. Analiza stanu zagadnienia .....                                      | 16 |
| 2.1. System wytwarzania i jego elementy .....                           | 16 |
| 2.2. Efektywność systemu wytwarzania .....                              | 23 |
| 2.2.1. Wskaźniki .....                                                  | 25 |
| 2.2.2. Strategie utrzymania ruchu .....                                 | 29 |
| 2.2.3. Podsumowanie .....                                               | 32 |
| 2.3. Nowe technologie informatyczne wsparcia systemów wytwarzania ..... | 32 |
| 2.3.1. Internet przedmiotów .....                                       | 34 |
| 2.3.2. Big data .....                                                   | 36 |
| 2.3.3. Chmura obliczeniowa .....                                        | 38 |
| 2.3.4. Mgła obliczeniowa .....                                          | 39 |
| 2.3.5. Systemy cyber-fizyczne .....                                     | 42 |
| 2.3.6. Sztuczna inteligencja .....                                      | 44 |
| 2.3.7. Przemysł 4.0 .....                                               | 45 |
| 2.3.8. Podsumowanie .....                                               | 56 |
| 2.4. Analiza danych z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych .....      | 57 |
| 2.4.1. Metody pozyskiwania danych produkcji .....                       | 58 |
| 2.4.2. Sygnał, szereg czasowy i strumień danych produkcji .....         | 63 |
| 2.4.3. Algorytmy dynamiczne .....                                       | 66 |
| 2.4.4. Podsumowanie .....                                               | 80 |
| 3. Poprawa efektywności systemu wytwarzania .....                       | 81 |
| 3.1. Założenia wstępne .....                                            | 81 |
| 3.2. Strategia prowadzenia badań .....                                  | 84 |
| 3.3. Badania doświadczalne .....                                        | 88 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.1. Stanowisko badawcze .....                                  | 88  |
| 3.3.2. Zarejestrowany sygnał .....                                | 99  |
| 3.3.3. Wstępne przetwarzanie danych.....                          | 100 |
| 3.3.4. Opracowane algorytmy dynamiczne.....                       | 112 |
| 3.3.5. Wyniki badań doświadczalnych.....                          | 121 |
| 3.3.6. Analiza wyników badań i możliwości ich wykorzystania ..... | 133 |
| 3.4. Metodyka poprawy efektywności systemu wytwarzania.....       | 138 |
| 4. Wnioski.....                                                   | 148 |
| 4.1. Wnioski poznawcze .....                                      | 148 |
| 4.2. Wnioski praktyczne.....                                      | 149 |
| 4.3. Kierunek dalszych badań .....                                | 150 |
| Literatura.....                                                   | 151 |
| Spis rysunków .....                                               | 161 |
| Spis tabel.....                                                   | 164 |
| Spis list.....                                                    | 165 |
| Załączniki.....                                                   | 166 |
| Załącznik nr 1 .....                                              | 166 |
| Załącznik nr 2 .....                                              | 174 |

# STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska podejmuje problematykę poprawy efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych opracowanych na bazie rozwiązań technologii informatycznych klasy przemysłu 4.0.

W dysertacji przeanalizowano stan zagadnienia w literaturze. Wskazano znaczenie efektywności w odniesieniu do zagadnień systemu wytwarzania. Scharakteryzowano technologie informatyczne i możliwości jakie dają ich zastosowania w ramach systemów wytwarzania szczególnie w perspektywie rozwiązań klasy przemysł 4.0. Wskazano metodę przetwarzania danych produkcyjnych pozwalającą na prowadzenie analizy danych odpowiednio do zmian systemu wytwarzania obserwowanych w czasie rzeczywistym – tworząc pętlę cyfrowego sprzężenia zwrotnego.

Mając za cel opracowanie spójnej metodyki poprawy efektywności z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych, opracowano algorytmy i przeprowadzono autorskie badania doświadczalne w środowisku i warunkach przemysłowych. Na potrzeby badań sporządzono stanowisko badawcze pozwalające pozyskiwać i przetwarzać dane. Dane poddane analizie stanowiły strumień danych będący szeregiem czasowym przyśpieszeń. Opracowany algorytm dynamiczny przetwarzał dane wskazując czy w danych pojawia się powtarzający wzorzec, co interpretowane było jako realizacja procesu technologicznego. Z kolei brak wzorca interpretowany był jako brak realizacji procesu technologicznego. Ta analiza pozwoliła na określenie efektywności maszyn jak i całego systemu wytwarzania.

W odniesieniu do otrzymanych wyników prac doświadczalnych przeprowadzono analizę jak i wskazano możliwości ich wykorzystania w kontekście harmonogramu i utrzymania ruchu.

Prace w ramach badań wdrożeniowych pozwoliły na opracowanie metodyki określającej zestaw niezbędnych działań, służących wykorzystaniu opracowanych algorytmów dynamicznych do poprawy efektywności systemu wytwarzania. Metodykę określono w formie procedury, która systematyzuje proces i określa jakie działania należy podjąć, aby poprawić efektywność systemu wytwarzania. Metodyka dostarcza uniwersalnego podejścia jako sekwencja kroków, które pozwolą na wykorzystanie algorytmów w kontekście przetwarzania sygnałów obrazujących proces wytwarzania w celu pozyskania danych o efektywności systemu wytwarzania.

Słowa kluczowe: efektywność systemu wytwarzania, algorytmy dynamiczne, przemysł 4.0

## ABSTRACT

The dissertation addresses the issue of improving the efficiency of the manufacturing system with the use of dynamic algorithms developed on the basis of industry 4.0 class solutions.

The dissertation analyzed the state of the issue in the literature. The importance of efficiency in relation to the issues of the manufacturing system was indicated. Information technologies and possibilities of their application within manufacturing systems have been characterized, especially in the perspective of solutions of industry 4.0 class. A method of processing production data has been indicated that allows conducting data analysis according to changes in the production system observed in real time – creating a digital feedback loop.

Aiming to develop a comprehensive methodology for efficiency improvement with the use of dynamic algorithms, the algorithms were developed and author's own experimental studies were conducted in the environment and industrial conditions. For the purposes of the research, a research stand was prepared which allows for data acquisition and processing. The data analyzed was a data stream being a time series of accelerations. The developed dynamic algorithm processed the data indicating whether a repeating pattern appears in the data, which was interpreted as the implementation of a technological process. The absence of a pattern was interpreted as the lack of a technological process. This analysis made it possible to determine the efficiency of machines and the entire production system.

In relation to the obtained results of the experimental work, a discussion was held as well as the possibilities of their use in the context of schedule and maintenance were indicated.

The works within the framework of the implementation research made it possible to develop a methodology defining a set of necessary actions to use the developed dynamic algorithms to improve the efficiency of the manufacturing system. The methodology was defined in the form of a procedure that systematizes the process and determines what actions should be taken to improve the efficiency of the manufacturing system. The methodology provides a universal approach as a sequence of steps that will allow the algorithms to be used in the context of processing signals representing the manufacturing process in order to obtain data on the efficiency of the manufacturing system.

Keywords: manufacturing system efficiency, dynamic algorithms, industry 4.0

## Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

|          |   |                                                                                                                                                                                |
|----------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BI       | – | analityka biznesowa, proces przekształcania danych w informacje, a informacji w wiedzę dla zwiększenia konkurencyjności przedsiębiorstwa ( <i>ang. business intelligence</i> ) |
| BLE      | – | technologia bezprzewodowej komunikacji ( <i>ang. bluetooth low energy</i> )                                                                                                    |
| CAD      | – | projektowanie wspomagane komputerowo ( <i>ang. computer aided design</i> )                                                                                                     |
| CAE      | – | komputerowe wspomaganie prac inżynierskich ( <i>ang. computer aided engineering</i> )                                                                                          |
| CAM      | – | komputerowe wspomaganie wytwarzania ( <i>ang. computer aided manufacturing</i> )                                                                                               |
| CAP      | – | komputerowo wspomagane planowanie procesów ( <i>ang. computer aided planning</i> )                                                                                             |
| CAQ      | – | komputerowo wspomagane sterowanie jakością ( <i>ang. computer aided quality</i> )                                                                                              |
| CC       | – | chmura obliczeniowa ( <i>ang. cloud computing</i> )                                                                                                                            |
| CIM      | – | komputerowo zintegrowane wytwarzanie ( <i>ang. computer integrated manufacturing</i> )                                                                                         |
| CM       | – | produkcyjna chmura obliczeniowa ( <i>ang. cloud manufacturing</i> )                                                                                                            |
| CMS      | – | system cyber-wytwarzania ( <i>ang. cyber-manufacturing systems</i> )                                                                                                           |
| CPS      | – | system cyber-fizyczny ( <i>ang. cyber-physical systems</i> )                                                                                                                   |
| CRISP-DM | – | metodyka wydobywania wiedzy z danych ( <i>ang. cross industry standard process for data mining</i> )                                                                           |
| DAMA     | – | koncepcja zgodna z zasadą „projektuj gdziekolwiek i produkuj gdziekolwiek” ( <i>ang. design anywhere, manufacture anywhere</i> )                                               |
| D-CL     | – | cyfrowa pętla zwrotna ( <i>ang. digital closed-loop</i> )                                                                                                                      |
| DS       | – | nauka o danych ( <i>ang. data science</i> )                                                                                                                                    |
| DT       | – | cyfrowy bliźniak ( <i>ang. digital twin</i> )                                                                                                                                  |
| EC       | – | przetwarzanie na krawędzi ( <i>ang. edge computing</i> )                                                                                                                       |
| ERP      | – | system zarządzania zasobami ( <i>ang. enterprise resource planning</i> )                                                                                                       |
| FC       | – | mgła obliczeniowa ( <i>ang. fog computing</i> )                                                                                                                                |
| FFT      | – | szybka transformacja fouriera ( <i>ang. fast fourier transformation</i> )                                                                                                      |
| IaaS     | – | model usługowy infrastruktura jako usługa ( <i>ang. infrastructure as a service</i> )                                                                                          |
| IDE      | – | zintegrowane środowisko programistyczne ( <i>ang. integrated development environment</i> )                                                                                     |
| IEEE     | – | instytut inżynierów elektryków i elektroników ( <i>ang. institute of electrical and electronics engineers</i> )                                                                |
| IIoT     | – | przemysłowy internet przedmiotów ( <i>ang. industrial internet of things</i> )                                                                                                 |

|      |   |                                                                                                                                                                                                                                                |
|------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IoT  | – | internet przedmiotów ( <i>ang. internet of things</i> )                                                                                                                                                                                        |
| JIT  | – | system dostaw dokładnie na czas, metoda zarządzania stosowana w celu redukcji pracy w toku i poziomu zapasów ( <i>ang. just in time</i> )                                                                                                      |
| JSON | – | lekki tekstowy format wymiany danych ( <i>ang. javascript object notation</i> )                                                                                                                                                                |
| MAAS | – | ultraszybki algorytm wyszukiwania podobieństwa ( <i>ang. mueen's algorithm for similarity search</i> )                                                                                                                                         |
| MES  | – | system realizacji produkcji ( <i>ang. manufacturing execution system</i> )                                                                                                                                                                     |
| MP   | – | profil macierzowy ( <i>ang. matrix profile</i> )                                                                                                                                                                                               |
| MŚP  | – | małe-średnie przedsiębiorstwa                                                                                                                                                                                                                  |
| MTBF | – | średni czas pomiędzy awariami lub częstość awarii ( <i>ang. mean time between failure</i> )                                                                                                                                                    |
| MTTR | – | średni czas naprawy ( <i>ang. mean time to repair</i> )                                                                                                                                                                                        |
| OEE  | – | całkowita efektywność wyposażenia, wskaźnik wykorzystywany w TPM mierzący efektywność wykorzystania maszyn i urządzeń ( <i>ang. overall equipment effectiveness</i> )                                                                          |
| PAAS | – | platforma jako usługa model usługowy udostępniania platform informatycznych z poziomu chmury obliczeniowej ( <i>ang. platform as a service</i> )                                                                                               |
| PLC  | – | programowalny sterownik logiczny ( <i>ang. programmable logic controller</i> )                                                                                                                                                                 |
| PLM  | – | klasa systemów wspierających przechowanie danych cyklu życia produktów ( <i>ang. product lifecycle management</i> )                                                                                                                            |
| PM   | – | utrzymanie zapobiegawcze ( <i>ang. preventive maintenance</i> )                                                                                                                                                                                |
| RFID | – | technika, która wykorzystuje fale radiowe do przesyłania danych oraz zasilania elektronicznego układu (etykieta RFID) stanowiącego etykietę obiektu przez czytnik, w celu identyfikacji obiektu ( <i>ang. radio-frequency identification</i> ) |
| RT   | – | system czasu rzeczywistego ( <i>ang. real-time</i> )                                                                                                                                                                                           |
| SAAS | – | oprogramowanie jako usługa ( <i>ang. software as a service</i> )                                                                                                                                                                               |
| SM   | – | inteligentne wytwarzanie ( <i>ang. smart manufacturing</i> )                                                                                                                                                                                   |
| SOA  | – | architektura systemów informatycznych zorientowana na usługi ( <i>ang. service oriented architecture</i> )                                                                                                                                     |
| TPM  | – | całkowite produktywne utrzymanie ruchu maszyn, jedna z metod lean management, służąca zapewnieniu maksymalnej efektywności maszyn i urządzeń ( <i>ang. total productive maintenance</i> )                                                      |
| TSC  | – | łańcuch szeregów czasowych ( <i>ang. time series chains</i> )                                                                                                                                                                                  |
| XML  | – | uniwersalny język znaczników przeznaczony do reprezentowania różnych danych w strukturalizowany sposób, standard wymiany danych rekomendowany przez organizację W3C ( <i>ang. extensible markup language</i> )                                 |

# 1. Wstęp

Podstawą działalności produkcyjnej jest posiadanie zasobów i technologii, dzięki którym możliwe jest wytwarzanie produktów. Przy czym samo posiadanie zasobów nie definiuje jednak zdolności realizacji funkcji produkcji. Dlatego wszelkie środki, którymi dysponuje przedsiębiorstwo powinny współdziałać w celu realizacji procesu produkcyjnego. Fundamentem tych działań jest odpowiednia kompozycja elementów systemu wytwarzania – zarówno po stronie maszyn jak i personelu technicznego (operatorzy, planiści, kierownicy). Pojawia się jednak pytanie jak określić to, czy dane działania wykonywane są efektywnie, czy też nie?

W rzeczywistości produkcyjnej, w której realizowane są kolejne partie produkcyjne, rozpoczynają się nowe uruchomienia, wdraża się nowych pracowników czy też instaluje nowe maszyny, trudno jest określić natychmiast (w danym momencie) czy dany system wytwarzania jest efektywny czy też nie.

Efektywność systemu wytwarzania zależy od szeregu czynników. W tym kontekście kluczowe jest to jakie maszyny tworzą system, jaka jest ich dostępność i kondycja. To stanowi zakres odpowiedzialności działów utrzymania ruchu. Pracownicy działów utrzymania ruchu zazwyczaj weryfikują działanie maszyn zgodnie z normami przedstawionymi przez producentów maszyn, objętych gwarancją. Normatywy wskazują, że maszyny powinny spełniać parametry działania określone w pewnym przedziale. Producenci wskazują przedział, gdyż są świadomi faktu, że maszyny pracują w różnym środowisku. Zatem poddawane są zróżnicowanym obciążeniom, przez co mogą się odmiennie zużywać i w efekcie ulegać awarii. Istnienie przedziału poprawnego działania nie wyczerpuje wątpliwości dotyczących tego czy system wytwarzania rzeczywiście poprawnie działa w odpowiedzi na warunki, w których się znajduje. Tym samym dla efektywności procesu produkcyjnego istotna będzie identyfikacja statusu procesu technologicznego realizowanego na danej maszynie. Identyfikacja będzie potrzebna zarówno dla poszczegółnej maszyny, jak i całego systemu wytwarzania realizującego proces wytwórczy. Można to określić jako zadanie identyfikacji efektywności systemu wytwarzania w rzeczywistych warunkach pracy maszyn, odpowiednio do realizowanego harmonogramu.

Zadanie to może być realizowane ręcznie, ale wraz z wdrożeniem nowoczesnych technologii informatycznych otwierają się nowe możliwości pozyskiwania danych o statusie systemu wytwarzania i tworzących go maszyn. Przy czym wraz z pozyskaniem danych niezbędne jest zaangażowanie odpowiednich dynamicznych algorytmów, które będą miały możliwość przetwarzania pozyskanego, zmiennego wolumenu danych.

Wykorzystując nowoczesne technologie informatyczne i sposoby przetwarzania danych opracowano algorytmy dynamiczne w kontekście produkcji. Przygotowane algorytmy posiadają zdolność odnajdywania wzorców

w ramach danych bez konieczności wcześniejszego trenowania. Ich zastosowanie nakierowane jest na identyfikację statusu maszyn produkcyjnych (obróbka/bieg jałowy). Obróbkę reprezentuje powtarzający się wzorzec, który można wyodrębnić. Czas obróbki jest z góry ustalony – decyduje o nim technologia wytwarzania. Czas pomiędzy wzorcami to czas biegu jałowego. Możliwość użycia wyników algorytmów jako miary systemu wytwarzania można wykorzystać na wiele sposobów (określenie efektywności, ustalenie rzeczywistych normatywów, prognoza realizacji zleceń, kontrola pracy pracowników). Wykorzystanie algorytmów otwiera drogę do nowych interdyscyplinarnych rozwiązań w dziedzinie inżynierii produkcji.

## **1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu**

Tematem rozprawy jest „**Poprawa efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych**”. Wskazane w ramach przeglądu literatury nowoczesne technologie informatyczne, sposoby pozyskiwania i przetwarzania danych otwierają perspektywy dla nowych rozwiązań w zakresie inżynierii produkcji w obszarze organizacji i poprawy efektywności systemu wytwarzania. Powiązanie środków technicznych z warstwą informatyczną, która pozwala na automatyczną identyfikację, monitoring i analizę, jest podstawą do proponowania usprawnień mających na celu zmniejszenie wolumenu produkcji w toku, poprawę jakości wytwarzanych wyrobów, obniżenie poziomu zapasów, skrócenie czasu i ilości przebrojeń, czy skrócenie cykli produkcyjnych. Zastosowania nowoczesnych technologii umożliwia odwzorowanie systemu wytwarzania w wybranym kontekście, w postaci cyfrowego obiektu. Dzięki temu można zarządzać systemem wytwarzania na zasadzie cyfrowego sprzężenia zwrotnego z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych w czasie rzeczywistym. To pozwala na formułowanie działań optymalizacyjnych, konserwacyjnych czy naprawczych zgodnie z przyjętą strategią utrzymania systemu.

To podejście może znaleźć zastosowanie w małych i średnich przedsiębiorstwach. Takie przedsiębiorstwa realizują zróżnicowany wolumen produkcji. Ich produkcja charakteryzuje się małymi seriami i dużą ilością przebrojeń. Przez co dysponują uniwersalnym parkiem technologicznym, w różnym stopniu zautomatyzowanym, składającym się z maszyn sterowanych numerycznie, specjalizowanych linii czy maszyn tradycyjnych. Ze względu na zróżnicowanie znacznie trudniej jest zdobyć dane dotyczące ich efektywności, jak i tworzonego przez nie systemu wytwarzania danego wyrobu. Pozyskanie takich danych stanowi koszt zarówno w zakresie inwestycji w infrastrukturę przedsiębiorstwa (zakup nowych urządzeń, sprzęt komputerowy) jak organizacji przedsiębiorstwa (zatrudnienie dodatkowej kadry, szkolenia). Przez co dane te albo pozyskiwane są ręcznie albo nie są zupełnie rejestrowane.

Wobec powyższego w celu minimalizacji kosztów, potrzebne jest rozwiązanie, które zupełnie niezależnie od możliwości parku maszynowego przedsiębiorstwa, zapewni akwizycje w czasie rzeczywistym i analizę danych w celu identyfikacji statusu maszyny w perspektywie wykazania efektywności systemu wytwarzania. Ponadto pojawia się potrzeba określania standardów tworzenia takich rozwiązań. Potrzebny jest sprawdzony sposób postępowania, wyjaśniający jak wdrożyć takie rozwiązanie. Metodyka, która wskaże kroki jakie należy wykonać, wiedzę jaką należy zaangażować by pomyślnie przeprowadzić projekt wdrożenia algorytmów dynamicznych analizy danych w obszarze produkcji.

Problematyka rozprawy została podjęta ze względu na zapotrzebowanie, głównie małych-średnich przedsiębiorstw. Z doświadczeń autora jak i analizy zagadnienia wynika, że większość stosowanych rozwiązań monitorowania efektywności stanowią mało wydajne rozwiązania (często angażujące wyłącznie czynnik ludzki), a nie pełny dynamiczny system. Stałe niezależne monitorowanie statusu stanowi sposób dla określania wskaźnika efektywności zarówno dla maszyny jak i całego systemu wytwarzania. Umożliwia jego lepsze nadzorowanie i daje podstawę do wdrożenia usprawnień, a zatem poprawy systemu wytwarzania. Jest mierzalną podstawą do podjęcia działań w zakresie harmonogramu czy też utrzymania ruchu.

Podsumowując, przedłożona rozprawa dotyczy poprawy działania systemu wytwarzania w perspektywie efektywności. Inspiracją dla badań rozprawy jest tematyka poprawy efektywności w obliczu pojawienia się nowych technologii informatycznych pozyskiwania danych z poziomu systemu wytwarzania. Rozprawa stanowi odpowiedź na problem w kompletowaniu wysokiej jakości danych będących podstawą identyfikacji efektywności w zróżnicowanych systemach wytwarzania. Podjęty temat rozprawy wpisuje się w dyscyplinę inżynierii produkcji, gdyż dotyczy organizacji i zarządzania procesami wytwarzania między innymi na potrzeby przemysłu obróbczego.

## 1.2. Cel, tezy i zakres pracy

*Celem niniejszej pracy jest opracowanie metodyki<sup>1</sup> poprawy efektywności systemu wytwarzania za pomocą opracowanych algorytmów dynamicznych. Metodyki stanowiącej uniwersalne podejście pozyskiwania danych o efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań pozyskiwania i analizy danych.*

---

<sup>1</sup> „Zbiór wytycznych dotyczących sposobów postępowania, które należy stosować przy określonej pracy lub dla osiągnięcia określonego celu” *Wielka Encyklopedia Powszechna*, PWN 1966

Odpowiednio do celu na łamach rozprawy formułowane są **dwie tezy**:

1. *Istnieje możliwość określenia statusu maszyny produkcyjnej na podstawie analizy dyskretnego sygnału obrazującego realizację procesu technologicznego obróbki części z wykorzystaniem opracowanych algorytmów dynamicznych.*
2. *Identyfikacja statusu poszczególnych maszyn systemu wytwarzania w czasie rzeczywistym pozwala na poprawę efektywności systemu wytwarzania poprzez lepsze wykorzystanie maszyn produkcyjnych w kontekście harmonogramu i utrzymania ruchu.*

Zakres pracy obejmuje:

- zarejestrowanie rzeczywistych danych procesów technologicznych,
- określenie sposobu obliczenia wskaźnika efektywności,
- opracowanie algorytmów dynamicznych bazujących na metodzie odległościowej,
- zaimplementowanie algorytmów przy pomocy języka programowania wysokiego poziomu,
- doświadczalne zweryfikowanie działania opracowanych algorytmów na danych rzeczywistych,
- sformułowanie metodyki poprawy efektywności systemu wytwarzania za pomocą opracowanych algorytmów dynamicznych na podstawie prac badawczych w środowisku produkcyjnym.

Realizacja zakresu prac ma na celu osiągnięcie następujących rezultatów:

- opracowanie algorytmów dynamicznych bazujących na metodzie odległościowej w celu określenia statusu maszyny produkcyjnej na podstawie analizy dyskretnego sygnału przyspieszeń obrazującego realizację procesu technologicznego obróbki części,
- opracowanie metodyki stanowiącej uniwersalny (możliwy do zastosowania dla różnych systemów wytwarzania) tok postępowania przy wdrażaniu rozwiązań zapewniających pozyskiwanie danych o efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań pozyskiwania i analizy danych.

Rozprawa składa się z czterech rozdziałów. Pierwszy rozdział przedstawia uzasadnienie podjęcia tematu oraz określony cel, tezy i zakres pracy. W rozdziale drugim przedstawiono dyskusję kluczowych pojęć i przybliżono technologie informatyczne, których rozwiązania znajdują zastosowanie na gruncie systemów wytwarzania. Wskazano rolę jaką odgrywają te technologie w realizacji czwartej rewolucji przemysłowej określanej mianem przemysł 4.0. Rozdział zawiera też charakterystykę nowoczesnych rozwiązań algorytmicznych i form danych

będących przedmiotem przetwarzania. W rozdziale trzecim zostały przedstawione warunki przeprowadzania badań eksperymentalnych pozyskania danych jak i ich przetwarzania. Szczegółowo rozdział zawiera opis stanowiska badawczego, charakterystykę zastosowanych narzędzi pomiarowych oraz definicje opracowanych algorytmów dynamicznych. Dalej zawarto analizę otrzymanych wyników badań doświadczalnych wraz z opisem możliwości ich zastosowań. Rozdział kończy sformułowana metodyka poprawy efektywności. W ostatnim, czwartym rozdziale zamieszczono wnioski poznawcze i użytkowe wynikające z przeprowadzonych badań.

## 2. Analiza stanu zagadnienia

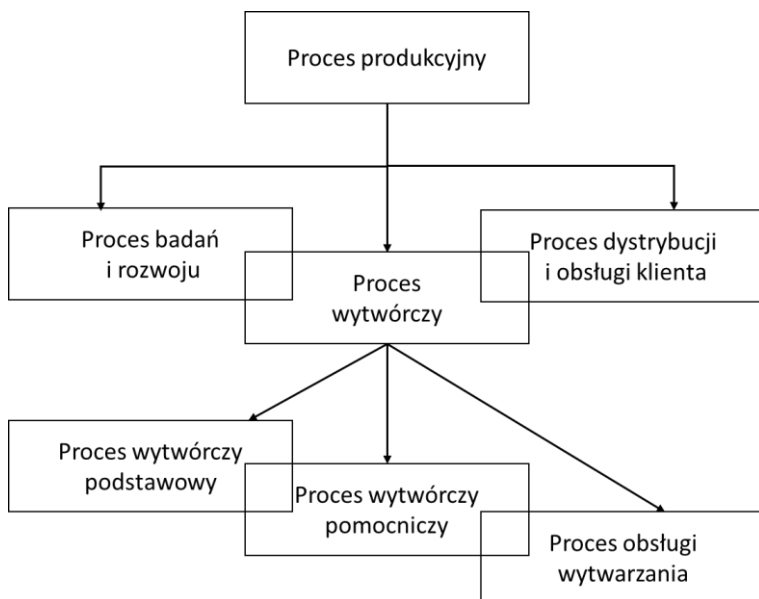
### 2.1. System wytwarzania i jego elementy

Współczesny rynek dóbr, wymaga wytwarzania nowych wyrobów wykorzystujących nowe technologie<sup>2</sup>, dostarczanych w krótkim czasie zgodnie z gustami i preferencjami klientów. Realizacja tego wymogu stanowi wyzwanie ciągłej zmiany przedsiębiorstw produkcyjnych zarówno w zakresie organizacji, jak i oferty produktów jakie wytwarzają. Zmienne gusta i konkurencja na rynku wśród producentów dóbr definiuje potrzebę poprawy sposobu funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych. W związku z tym, w obszarze produkcji stale poszukuje się sposobów, które pozwolą produkować lepiej, szybciej, zachowując rentowność realizowanej produkcji. Poszukiwania te dotyczą różnych aspektów działalności przedsiębiorstwa. Odpowiednie zmiany proponowane są zarówno w zakresie organizacji jak i rozwiązań technicznych. W przypadku przedsiębiorstw produkcyjnych, zmiany te bezpośrednio wpływają na realizowaną przez nie produkcję. Przy czym pod pojęciem produkcji rozumiany jest całokształt działań, w wyniku których z materiałów powstaje gotowy produkt o określonej wartości użytkowej [10]. Oznacza to, że produkcja to zespół skoordynowanych procesów pracy, w których świadoma i celowa działalność ludzka przekształca przedmioty pracy w produkty (wyroby i usługi), używając do tego środków pracy. Z produkcyjno-organizacyjnej perspektywy produkcja to proces w którym dzięki kolejnym operacjom technologicznym następuje zmiana kształtu bądź właściwości mechanicznych wyrobu. Ze względu na to, pojęcie produkcji niejednokrotnie utożsamiane jest z pojęciem procesu produkcyjnego [103]. Proces produkcyjny, oprócz bezpośredniej zmiany kształtu czy też własności, dotyczy również technicznego przygotowania nowych wyrobów, utrzymania ruchu maszyn i urządzeń, magazynowania, napraw regeneracji, zakupu narzędzi, a także organizacji pracy i zarządzania [10]. Z tego powodu proces produkcyjny dzieli się na proces badania i rozwoju, proces wytwórczy oraz proces dystrybucji i obsługi klienta. Struktura procesu produkcyjnego i wytwórczego zobrażowana została na rysunku 1. W ramach procesu wytwórczego wyróżnia się także proces podstawowy, pomocniczy i obsługi wytwarzania. Proces wytwórczy podstawowy jest związany bezpośrednio z procesem wytwarzania, zaś pomocniczy wiąże się z utrzymaniem ruchu

---

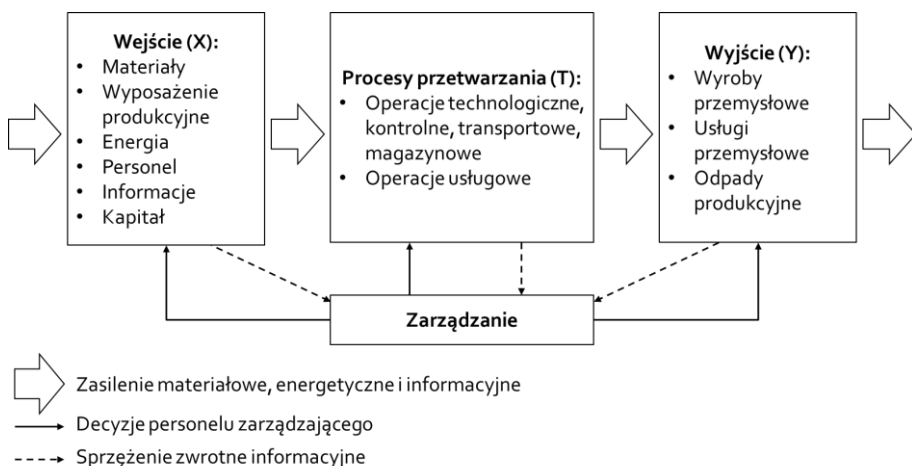
<sup>2</sup> Nowe technologie stanowi wiedza technologiczna „w postaci wartości niematerialnych i prawnych, w szczególności wyniki badań i prac rozwojowych, która umożliwia wytwarzanie nowych lub udoskonalanie wyrobów lub usług i która nie jest stosowana na świecie przez okres dłuższy niż ostatnich 5 lat, co potwierdza opinia niezależnej (...) jednostki naukowej w rozumieniu ustawy z 30 kwietnia 2010 r. o zasadach finansowania nauki (Dz.U. Nr 96, poz. 615) – art. 18b ust. 2 updog”, art. 10, 12, 16, 33 ustawy z 30 kwietnia 2010 r. – Przepisy wprowadzające ustawy reformujące system nauki – Dz.U. Nr 96, poz. 620.

i remontami oraz infrastrukturą i utylizacją różnorodnych odpadów poprodukcyjnych. Proces obsługi zajmuje się natomiast obsługą administracyjną jak i działaniami utrzymania czystości. W procesie produkcyjnym kluczowe znaczenie ma podstawowy proces wytwórczy ponieważ jego realizacja generuje bezpośrednio zyski zaś pozostałe procesy służą jego jak najlepszej realizacji.



Rys. 1. Struktura procesu produkcyjnego i wytwórczego [10]

Do realizacji działań procesu produkcyjnego służy system produkcyjny. To jest celowo zaprojektowany układ materiałowy, energetyczny i informacyjny eksploatowany przez człowieka, służący wytwarzaniu określonych produktów czyli wyrobów lub usług w celu zaspokajania różnych potrzeb konsumentów. Model systemu charakteryzowany jest szczegółowo z perspektywy procesów przetwarzania T oraz elementów wejścia X i elementów wyjścia Y (Rys. 2). Do wejścia należy zaliczyć materiały, wyposażenie produkcyjne, energię, personel, informację i kapitał. Natomiast wyjście to wyroby przemysłowe, usługi przemysłowe oraz odpady produkcyjne [10].



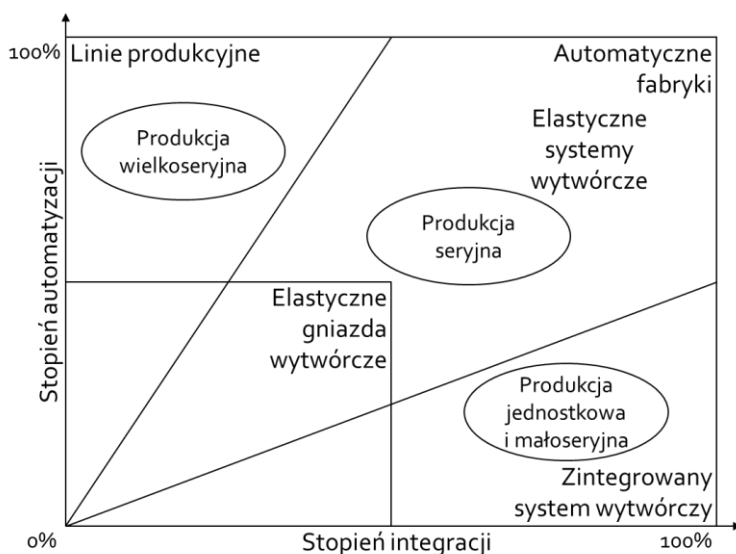
Rys. 2. Uogólniony model systemu produkcyjnego [10]

Zmiana w obrębie elementów X i Y definiowana jest przez procesy przetwarzania T, które stanowią szereg operacji zarówno technologicznych, kontrolnych, transportowych jak i magazynowych. Operacje te mają na celu przekształcenie materiałów, energii i informacji w produkt, usługę i towarzyszący im odpad. Za realizację procesów przetwarzania odpowiedzialny jest system wytwarzania, który jest jednym z podsystemów systemu produkcyjnego. System wytwarzania jest zbiorem stanowisk roboczych powiązanych relacjami wynikającymi z procesu wytwórczego. Powiązania te mogą mieć różny charakter:

- konfiguracyjny – rozmieszczenie stanowisk lub modułów wytwórczych,
- technologiczny – fazy procesu wytwórczego, operacji, zabiegów,
- administracyjny – obsługa i zarządzania wytwarzaniem,
- funkcjonalny – sterownie procesem wytwórczym.

System wytwarzania utożsamia się nie tylko ze stanowiskami roboczymi, ale bezpośrednio z maszynami, które uczestniczą w realizacji cyklu produkcyjnego [97]. Edward Chlebus proponuje przykładowy podział systemów wytwórczych z uwagi na stopień ich automatyzacji i integracji, który ilustruje rysunek 3. Stopień automatyzacji rozumiany jest jako ilość maszyn wykonujących pracę przez automaty produkcyjne. Natomiast stopień integracji wyraża ilość systemów wsparcia produkcji w danym systemie wytwarzania. W związku z tym systemy wytwarzania charakteryzowane przez wysoki stopień automatyzacji, a niski stopień integracji to linie produkcyjne dedykowane dla produkcji wielkoseryjnej. W przypadku gdy występuje średni poziom automatyzacji i integracji systemy wytwarzania organizowane są w formie elastycznych gniazd wytwórczych. Poziom wysoki dedykowany jest produkcji seryjnej, gdzie wyodrębnia się elastyczne systemy wytwórcze. Dalej dla poziomu bardzo wysokiego systemy wytwarzania zorganizowane są w formie automatycznych fabryk. Kolejną grupę

systemów wytwarzania, tworzą te dedykowane produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Ten typ systemów charakteryzuje niski poziom automatyzacji, a wysoki poziom integracji. Chlebus wskazuje, że podział należy traktować jako umowny gdyż podkreśla tylko główne atrybuty i funkcjonalne cechy systemów wytwórczych [16].



Rys. 3. Przykłady realizacyjnych koncepcji systemów wytwarzania [16]

Posiadanie zaawansowanego systemu wytwarzania składającego się z nowoczesnych maszyn nie jest tożsame z faktem ich efektywnego wykorzystania. Dlatego praca systemu wytwarzania powinna być zawsze dokładnie planowana, kontrolowana jak i nieustannie usprawniana. Poprawa systemu ma na celu minimalizować ryzyko i konsekwencje nieplanowanych przestoi jak i wykorzystać możliwe zdolności produkcyjne. Poprawę procesu można uzyskać poprzez podejście diagnostyczne, bazujące na analizie i krytycznej ocenie jego cech i właściwości. Innym sposobem jest podejście prognostyczne polegające na określeniu wzorcowego systemu i kształtowanie wybranego systemu według określonego wzorca. Poprawa może też być realizowana w sposób mieszany, łącząc własności wymienionych wcześniej podejść [93]. Poprawa ma prowadzić do zwiększenia wydajności produkcji przy zachowaniu oczekiwanej przez klientów jakości jak i jednoczesnym obniżeniu kosztów. Realizacja tego wymagania wymusza odpowiednią organizację oraz ściśle monitorowanie systemów wytwarzania. Powtarzając za profesorem Tadeuszem Kotarbińskim: „Każde wszak działanie jest pewnym procesem, pewną zmianą odbywającą się w czasie, ma pewien tok, zawiera w sobie zawsze jakieś przemieszczanie się części składowych takiej czy innej całości” [48]. Obserwacja

poszczególnych części składowych umożliwia utrzymanie ciągłości działania jak i usprawnienia całego procesu. Ważne jest to, by jedno konkretne działanie przedsiębiorstwa przekładało się w jak największym stopniu na pożądany skutek (działanie efektywne). Zadanie to stanowi kluczowy kierunek rozwoju organizacji i monitorowania systemów wytwarzania zarówno w małych, średnich jak i dużych przedsiębiorstwach.

Potrzebne są zarówno skuteczne sposoby tworzenia systemów wytwarzania, jak i wiarygodne miary efektów ich działań. Ma to szczególne znaczenie ze względu na fakt, że system wytwarzania wspiera realizację procesu produkcyjnego i jego działanie jest mu podporządkowane. Te dwa wymiary muszą ściśle współgrać w celu spełnienia warunków, jakie stawia współczesny rynek. Nie jest to proste zadanie i wymaga szerszego spojrzenia zarówno w wymiarze poszczególnych procesów technicznych, ale też czynnika ludzkiego. Zadanie konstruowania takich systemów obciąża inżynierów produkcji do posiadania szerokiej wiedzy i wielu umiejętności. Wymaga używania specjalnych narzędzi jak i korzystania z różnorodnych metod wykorzystywanych przez inne dziedziny nauk. Zakres takiego zadania znajduje się w polu zainteresowań inżynierii produkcji, którą określa się mianem nauki interdyscyplinarnej.

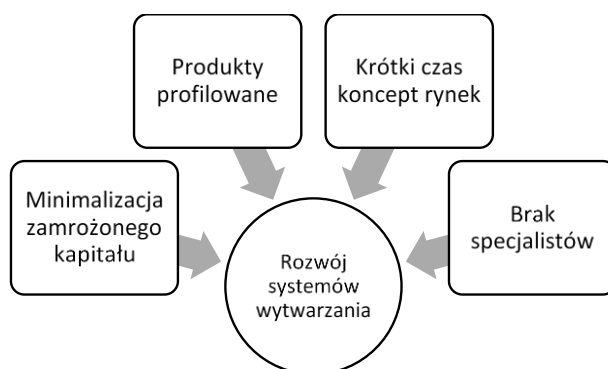
Tadeusz Karpiński w książce „Inżynieria produkcji” wskazuje, że inżynieria produkcji to dyscyplina, która łączy i korzysta z nauki zarządzania jak i budowy maszyn przy zastosowaniu teorii i technologii informatycznych [45]. Wskazuje też, że pojęcie inżynierii produkcji nie ma w polskiej literaturze technicznej ścisłej definicji [45]. Karpiński dodaje, że pod tym pojęciem rozumie dyscyplinę naukową, zajmującą się zasadami projektowania wyrobów i procesów, jak również podstawami sterowania, eksploatacji, organizacji i zarządzania procesami wytwarzania. Projektowanie odnosi się do wyrobów (na przykład konstrukcji maszyn, urządzeń i środków technicznych produkcji) oraz procesów technologicznych, a także organizacji produkcji. Dodaje, że istotną dziedzinę inżynierii produkcji stanowi projektowanie procesów technologicznych. W tym zaś obszarze niezbędna jest wiedza z zakresu technologii. W podobnym tonie definicję inżynierii produkcji przedstawia Komitet Inżynierii Produkcji PAN. Komitet wskazuje, że „inżynieria produkcji zajmuje się projektowaniem, zarządzaniem i racjonalizacją procesu produkcji, przy wykorzystaniu komputerowego wspomaganie. W ujęciu przyjętym w krajach zachodnich integruje projektowanie i planowanie procesów wytwarzania z projektowaniem, organizowaniem i sterowaniem procesów produkcyjnych” [99].

Tym samym, na potrzeby pracy określono, że inżynieria produkcji to nauka zajmująca się złożonymi interdyscyplinarnymi problemami związanymi z zagadnieniami planowania, projektowania, implementowania, zarządzania i zabezpieczenia systemów produkcyjnych oraz systemów logistycznych i wymaga stosowania zaawansowanych metod. Metody te muszą zapewniać zarządzanie dużymi zbiorami danych zarówno w zakresie pozyskania,

skutecznego gromadzenia, przechowywania jak i generowania poprawnych decyzji w zakresie pojawiających się problemów [88].

Ze względu na interdyscyplinarną naturę problemów, potrzebne są odpowiednie narzędzia i rozwiązania. W tym zakresie inżynieria produkcji szczególnie korzysta z intensywnie rozwijających się technologii informatycznych. Korzystając z rozwiązań technologii informatycznych, opracowywane są nowe koncepcje systemów wytwórczych czy też wdrażane są udoskonalenia poszczególnych ich elementów. Działania te biorą pod uwagę czynniki determinujące rozwój współczesnych systemów wytwarzania (Rys. 4), do których zalicza się [85]:

- minimalizację zamrożonego kapitału – wyrażoną wartością produkcji w toku. Im większy zamrożony koszt produkcji, tym większe ryzyko prowadzenia produkcji i możliwości ewentualnych strat w przypadku braku zamówień, szybkich zmian gustów klientów,
- produkty profilowane przez zapotrzebowanie (*ang. demand-driven products*) – produkty tworzone na podstawie badań preferencji klientów. Klienci chcą kupować nowe, innowacyjne, personalizowane, niedrogie i praktyczne produkty,
- preferowany krótki czas od konceptu do produktu na rynku (*ang. short time-to-market*) – klienci oczekują nowych lepszych produktów, ale cechują się małą tolerancją na konieczność czekania, na nowy produkt lub model produktu,
- brak specjalistów – brak dostępu bądź utrudniony dostęp do specjalistów posiadających doświadczenie, umiejętności i wiedzę. Kadry posiadające kwalifikacje z zakresu inżynierii produkcji. Co więcej, kadry, która zna zagadnienia nowoczesnej produkcji i będzie w stanie obsługiwać nowoczesne maszyny produkcyjne.



Rys. 4. Czynniki determinujące rozwój systemów wytwarzania [85]

W związku z intensyfikacją produkcji oraz zmiennym popytem niezbędne jest zastosowanie narzędzi, które zarówno zapewnią optymalizację, jak

i zminimalizują ryzyko podjęcia niewłaściwej decyzji zarządczej. W przypadku produkcji masowej jeden błąd powielony wiele razy może naruszyć stabilność finansową całego przedsiębiorstwa. Natomiast w przypadku produkcji warsztatowej jeden produkt może być przyczyną utraty dobrego zdania klientów o wyrobach warsztatu.

Kontrola systemu wytwarzania stanowi jeden z kluczowych aspektów produkcji. Adekwatnie do zadanych parametrów kontroli podejmowane zostają decyzje w zakresie ilości wytworzonych produktów jak i alokacji zasobów. Co więcej, na podstawie tych decyzji generowane są plany produkcyjne i harmonogramy. Rezerwowane są zasoby materiałowe oraz środki finansowe. Ze względu na zakres działań, odpowiednie decyzje muszą być podejmowane sprawnie – tak, by co najmniej minimalizować ryzyko produkcji wadliwych części przy zachowaniu jak najkrótszego czasu realizacji zamówienia. Potrzebę tą potęgują uwarunkowania współczesnych rynków zbytu i wymagania biznesowe, takie jak produkcja produktów determinowanych popytem czy też wzrastające skrócenie czasu dostarczenia nowych produktów na rynek.

Dlatego zarządzanie produkcją musi obywać się na bieżąco, uwzględniając wszelkie zmiany, ryzyka, zakłócenia oraz wahania popytu, zarówno w skali kraju, jak i całego świata. Jest to zadanie trudne i stąd pojawia się potrzeba budowy systemów informatycznych, które będą na bieżąco, to jest automatycznie dostosowywały produkcję do zmieniających się uwarunkowań [22]. W ślad za Tadeuszem Kotarbińskim: „postępowa rola automatyzmu polega na tym, że dzięki niemu pewne cenne procesy odbywają się same, bez kierowniczej interwencji podmiotu działającego, który jest odciążony dzięki temu od pewnych robót i może skupić cały swój świadomy wysiłek na czymś innym” [48].

Współcześnie, dzięki intensywnemu rozwojowi technologii informatycznych, coraz większa ilość systemów wytwarzania w przedsiębiorstwach jest zarządzana z wykorzystaniem systemów informatycznych. Sposób zarządzania oraz typ zastosowywanego oprogramowania zależą głównie od potrzeb biznesowych i produkcyjnych przedsiębiorstwa [52]. Ma to szczególne znaczenie ze względu na fakt, że współcześnie liczące się przedsiębiorstwa produkcyjne w obrębie danej branży charakteryzuje to, że dysponują podobnym parkiem maszynowym, podobnymi technologiami produkcji jak i zasobami ludzkimi. Pomimo tych podobieństw między przedsiębiorstwami, występuje zróżnicowanie cen oferowanych produktów. Niektóre z przedsiębiorstw potrafią oferować produkty po znacznie niższych cenach przy zachowaniu marży i oczekiwanej jakości dla klienta. Odpowiedzią na to zjawisko jest zdolność wewnętrznej efektywnej organizacji w wymiarze technicznym, technologicznym i społecznym, która pozwala na minimalizowanie uzasadnionego czasu pobytu produktu w środowisku wytwórczym. To przekłada się na niższe koszty produkcji a zatem większą elastyczność w zakresie definiowania marży na produkcie i w wyniku tego lepszą finalną cenę.

To co kształtuje wymiar relacji uzasadnionego czasu pobytu do zamrożonego kosztu kapitału, zależy od kadry kierowniczej i przyjętego sposobu organizacji. Jednym z takich sposobów, które współcześnie cieszy się dużym zainteresowaniem, jest szczupłe zarządzanie (*ang. lean manufacturing, LM*) [53], [84]. LM zakłada wykorzystanie metod organizacji produkcji takich jak: system dostaw dokładnie na czas (*ang. just in time, JIT*), automatyzacja czy utrzymanie ciągłej produktywności maszyn. Sposoby te wymagają gruntownej zmiany filozofii pracy przedsiębiorstw i odpowiedniego do rodzaju produkcji czasu wdrożenia. Innym podejściem zapewniającym doskonalenie wewnętrznej organizacji jest wykorzystanie technologii informatycznych. Szczególnie w zakresie wdrażania i integracji systemów informatycznych wspierających koordynację działań wykonywanych przez różne oddziały, wydziały czy jednostki przedsiębiorstwa, bądź wiele przedsiębiorstw.

Podsumowując, procesy wytwórcze i systemy wytwarzania zmieniają się w odpowiedzi na nowe wymagania im stawiane. Istnieje wiele sposobów poprawy systemów wytwarzania, zarówno te organizacyjne jak i technologiczne. Ze względu na rozwój technologii informatycznych, wzrasta ilość i zakres aspektów procesów, które są informatyzowane i zmieniane pod wpływem nowych trendów, koncepcji i korzyści wynikających z ich zastosowania we wsparciu realizacji zadań systemów wytwarzania.

## 2.2. Efektywność systemu wytwarzania

Pojęcie efektywności jest przedmiotem wielu dyskusji a także publikacji. Efektywność dotyczy zarówno gospodarki, przedsiębiorstw, procesów, finansów, sterowania, czy też inwestycji. W literaturze znaleźć można wiele różniących się definicji dotyczących pojęcia efektywności [102].

Tadeusz Pszczółowski w ślad za Kotarbińskim definiuje efektywność jako „dodatnią cechę działań (ocenę) dających jakiś oceniany pozytywnie wynik”. Jego interpretacja wychodzi poza skuteczność, bo jak dodaje: „działanie jest oceniane pozytywnie bez względu na to, czy wynik był zamierzony czy niezamierzony” [94]. Zatem przez efektywność należy rozumieć za Tadeuszem Pszczółowskim, nie pozytywny rezultat, czy też wartość rezultatu, ale dodatnią cechę działań intencjonalnych, których skutki można określić mianem efektywnych. To jest realnych i uzyskujących na tle innych rezultatów ocenę pozytywną o niebagatelnej wartości z uwagi na określone kryterium oceny. Przy określonym sposobie wartościowania działań ze względu na to kryterium. Efektywność może być stopniowana albo nie podlegać stopniowaniu [113]. Odpowiednio do przyjętego kontekstu ekonomicznego, społecznego czy też technicznego efektywność definiowana jest w różny sposób [102].

Teoretycy zarządzania twierdzą, że efektywność to kryterium dla działania organizacji i warunkuje jej rozwój – może stanowić narzędzie oceny funkcji

zarządzania. Efektywność jako miara może obrazować szybkość reakcji na wyzwania, które definiuje rynek, a także oczekiwania jego uczestników. Dlatego stanowi narzędzie budowania przewagi konkurencyjnej [102].

Ze względu na dużą ilość definicji, efektywność jest pojęciem trudnym do jednoznacznego zdefiniowania. Szczególnie w polskojęzycznej literaturze można znaleźć pojęcia bliskoznaczne, takie jak skuteczność, sprawność czy wydajność. Nie jest to poprawna interpretacja, bowiem wydajność i efektywność nie zawsze mierzą i oznaczają to samo, a efektywność jest pojęciem bardziej ogólnym. Właściwie do powyższych wskazań autor przyjmuje, że jeśli coś jest efektywne, oznacza to, że działa lepiej, zyskowniej, odpowiednio do pojawiających się potrzeb i ma pozytywny wpływ na realizowany proces wytwarzania [113].

Efektywność w inżynierii produkcji definiowana jest za pomocą odpowiednich technicznych miar, wskaźników czy statystyk. Techniczny wymiar efektywności pozwala ją mierzyć, stopniować i na jej podstawie podejmować decyzje zarządcze. W zależności od tego jaki poziom efektywności został wykazany przez dany system wytwarzania powinny zostać podjęte określone działania. Poziom efektywności może stanowić uzasadnienie podejmowanych działań w wymiarze ekonomicznym dla systemów wytwarzania. Na przykład w wymiarze oceny inwestycji bądź argumentów dla działań optymalizacyjnych.

Kluczowy jest jednak sposób wyznaczania efektywności w perspektywie wybranego systemu wytwarzania. W tym przypadku, miary efektywności systemów wytwarzania koncentrują się na maszynach i urządzeniach realizujących wybrane procesy produkcyjne. Zagadnienie oceny efektywności maszyn i urządzeń można analizować co najmniej w dwóch kontekstach. Pierwszy z nich ma istotę rachunkowo-finansową i dotyczy ujęcia efektywności pod względem pieniężnym. W aspekcie ekonomicznym, efektywność jest wynikiem działalności gospodarczej przedsiębiorstwa, będący stosunkiem uzyskanego efektu do poniesionego nakładu:

$$\text{Efektywność} = \frac{\text{Efekty}}{\text{Nakłady}} \quad (1)$$

Efektywność zatem można traktować jako miarę, przedstawioną zazwyczaj w postaci procentowej. W tym ujęciu wskaźniki konstruowane są jako stosunek zysku netto (lub innej wybranej kategorii z rachunku zysków i strat wyniku finansowego) do wartości bilansowej dla wybranej grupy urządzeń i maszyn. Taka kalkulacja i wskaźnik pozwalają określić ile procent osiągniętego zysku wyraża wybrana część aktywów trwałych [4].

Zgodnie ze wzorem (1) należy wyróżnić kilka sposobów podniesienia efektywności działania poprzez [47]:

- obniżenie nakładów, przy jednoczesnym utrzymaniu dotychczasowego poziomu efektów,

- obniżenie nakładów, przy jednoczesnym podwyższeniu poziomu efektów,
- utrzymanie dotychczasowego poziomu nakładów, przy jednoczesnym podwyższeniu poziomu efektów,
- podwyższenie dotychczasowego poziomu nakładów, przy jednoczesnym drastycznym podwyższeniu poziomu efektów.

Drugi kontekst oceny efektywności ma charakter techniczno-produkcyjny. Dotyczy on aspektów ilościowych produkcji, takich jak wielkość produkcji czy czas. W tym znaczeniu efektywność wyraża rotacyjność (obrotowość) czyli przychody ze sprzedaży produktów towarów i materiałów do wartości bilansowej danej grupy maszyn i urządzeń. Wskazana miara określa zatem liczbę cykli produkcyjnych realizowanych przez daną grupę majątkową w określonym czasie (typowo jest to rok obrotowy).

Ze względu na to, że efektywność jest pojęciem wielowymiarowym do jej wyznaczenia może też zostać wybrany wymiar techniczno-eksploatacyjny, informacyjno-operacyjny czy wymiar dotyczący bezpieczeństwa [4].

To jakie wskaźniki przyjmowane są do analiz, wynika ściśle z potrzeb przedsiębiorstwa i specyfiki jego działalności. Ze względu na to, określanie miary efektywności na podstawie szeregu wskaźników technicznych, ekonomicznych stanowi skomplikowane wyzwanie. Ponadto, dopiero zestaw wskaźników pozwala zidentyfikować potrzebny aspekt efektywności.

### 2.2.1. Wskaźniki

Celem wyznaczenia efektywności należy sformułować wskaźnik, który pozwoli zarówno ustalić charakterystykę danego aspektu, a także stanowić kryterium jego oceny. Wskaźniki można definiować samodzielnie, ale można też skorzystać z powszechnie stosowanych, standardowych wskaźników. Te najbardziej istotne dla przedsiębiorstwa oznacza się mianem kluczowych wskaźników efektywności (*ang. key performance indicators, KPI*). KPI są stosowane do pomiaru stopnia realizacji celów organizacji. Przez co mają duże znaczenie dla budowania zorientowanej na wyniki kultury organizacyjnej przedsiębiorstwa. Stanowią dla pracowników źródło obiektywnej informacji zwrotnej o wykonywanej przez nich pracy, kosztach oraz jakości. KPI są także narzędziem kontroli zarządczej, pozwalającej sprawnie podejmować decyzje, planować i nadawać priorytety działaniom oraz reagować na pojawiające się problemy. Wspierają również procesy ciągłego doskonalenia i wykorzystywanie potencjału posiadanych przez organizację zasobów. Sposoby definiowania i wykorzystywania KPI określa norma ISO 22400 [117]. Wiele wskaźników jest formułowanych właściwie dla potrzeb przedsiębiorstwa, w odniesieniu do danego aspektu jego działalności. Przykładowo w zakresie jakości jako KPI definiuje się: liczbę niezgodności na jednostkę, liczbę niezgodności na możliwość, liczbę

jednostek wadliwych na milion [36]. Natomiast w zakresie zarządzania operacyjnego, określa się: całkowitą efektywność wyposażenia (*ang. overall equipment effectiveness, OEE*), wydajność pracy (wartość produktów lub usług wytworzonych przez jednego pracownika), wartość odpadu produkcyjnego. Czy w zakresie zarządzania zasobami ludzkimi: absencja chorobowa pracowników (liczba godzin nieobecności/liczba zaplanowanych godzin pracy ogółem w danym okresie), rotacja pracowników (dobrowolne odejścia), satysfakcja pracowników, czy ilość godzin szkoleń na jednego pracownika w roku. Natomiast w zakresie obsługi klienta: koszt pozyskania klienta, poziom satysfakcji klientów, procent terminowych dostaw do klientów (liczba reklamacji/liczba zrealizowanych wysyłek do klientów ogółem).

W perspektywie niniejszej pracy, ze względu na opisywane zagadnienie systemu wytwarzania, szczegółowo scharakteryzowany zostanie wskaźnik OEE. Wskaźnik OEE należy do kompleksowych metod oceny efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń [42]. OEE umożliwia monitorowanie i kontrolę procesu produkcyjnego, gdyż pokazuje wykorzystanie wyposażenia produkcyjnego i wydajności maszyn bez wpływu czynników zakłócających [57], [109]. OEE oblicza się jako iloczyn wskaźników: dostępności, jakości i wydajności [29], [37], wyrażony w procentach:

$$OEE = \text{dostępność} * \text{jakość} * \text{wydajność} * 100\% \quad (2)$$

Dostępność we wzorze jest procentowym udziałem czasu, w jakim wykorzystuje się daną maszynę w procesie produkcji, jest to iloraz czasu rzeczywistego pracy maszyny do planowanego czasu jej wykorzystania w procesie produkcji. Wszystkie awarie, niedobory materiałów do produkcji lub zmiany pracownicze mogą przyczyniać się do zatrzymania maszyny oraz zmniejszenia jej czasu dostępności w procesie. Do obliczenia dostępności należy zmierzyć momenty włączania i wyłączania maszyny w określonym czasie produkcji.

$$\text{Dostępność} = \frac{\text{Czas zmiany} - \text{Czas postoju}}{\text{Czas zmiany}} \quad (3)$$

$$\text{Czas zmiany} = \text{Konserwacje} + \text{Przebrojenia} + \text{Awaryje} + \text{Inne} \quad (4)$$

$$\text{Wydajność} = \frac{\text{Produkcja wykonana}}{\text{Czas zmiany} * \text{Wydajność znamionowa}} \quad (5)$$

$$\text{Jakość} = \frac{\text{Produkcja wykonana} - \text{Braki}}{\text{Produkcja wykonana}} \quad (6)$$

Jakość jest wyrażona jako procentowy udział czasu, w jakim maszyna produkuje wyroby o określonej jakości w całym czasie produkcji. Stratami jakościowymi są wszystkie produkty wymagające powtórnej obróbki na danej maszynie, materiały wsadowe nieobrobione przez maszynę, a także wszystkie wyroby gotowe, które nie spełniają założonych standardów jakościowych.

Wydajność jest to wielkość, która określa zdolność produkcyjną maszyny przy prędkości znamionowej przebiegu procesu produkcyjnego. Zdolności operatora maszyny, jakość materiałów wsadowych, stopniowe zużywanie się maszyny, okresowe wstrzymania pracy oraz konieczność korekty, napraw, prowadzą do zmniejszenia wydajności. Często straty wydajności okazują się jedynym możliwym wyjaśnieniem dla niemierzalnych lub niedających się kategorizować strat. Przy czym są one trudne do zmierzenia, biorąc pod uwagę częstość występowania oraz różnorodność czynników.

Zaletą OEE jest to, że pozwala uwzględnić zarówno czas dostępności maszyn, jak i ich wydajność oraz jakość otrzymanej produkcji, a zatem rezultaty całego procesu produkcyjnego. Wskaźnik ten jest czytelny i łatwy w interpretacji. Jednak należy zachować ostrożność w porównaniach międzybranżowych i uogólnianiu norm tego wskaźnika, które powinny zależeć od specyfiki procesu produkcyjnego [42]. Właściwe wykorzystanie OEE, w celu poprawy systemu wytwarzania, wymaga przeprowadzania pomiarów oraz identyfikacji wszystkich typów strat (Rys. 5) występujących w procesie produkcji.

|                                           |       |                      |                                   |
|-------------------------------------------|-------|----------------------|-----------------------------------|
| Całkowity czas produkcji (Czas zamówiony) |       |                      |                                   |
| Czas operacyjny                           |       |                      | Planowanie postoje<br>i czynności |
| Dostępność                                |       | Awarie               |                                   |
| Wykorzystanie                             |       | Strata<br>wydajności |                                   |
| Jakość                                    | Braki | Straty               |                                   |

Rys. 5. Struktura OEE i straty [120]

Zastosowanie wskaźnika przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania maszyn. Pomimo, że wskaźnik odnosi się do maszyn, wskazuje także problemy związane z organizacją pracy ludzi i całego procesu oraz gospodarką materiałową. W ramach obliczenia OEE określa się wymiar strat nieplanowanych przestojów maszyn, niespełniających wymogów jakości produkowanych wyrobów oraz wydłużonych czasów cyklu pracy maszyn i urządzeń. Po to by maksymalizować wskaźnik OEE należy dążyć do

zminimalizowania występowania awarii i przestojów. Kategoryzacja strat została wskazana w tabeli 1.

Tabela 1. Straty w kategoriach OEE

| Kategoria OEE      | Straty                 | Powody                                                  |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|
| Utrata dostępności | Nieplanowane przestoje | Awaria sprzętu                                          |
|                    | Planowane postoje      | Ustawienia i regulacje                                  |
| Strata wydajności  | Krótkie przestoje      | Zatrzymanie na biegu jałowym i inne krótkie zatrzymania |
|                    | Powolne cykle          | Zredukowana prędkość                                    |
| Utrata jakości     | Braki produkcyjne      | Wady procesu                                            |
|                    | Braki uruchomienia     | Zredukowana wydajność                                   |

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [120]

Zastosowanie wskaźnika OEE przynosi następujące korzyści [50]:

- poprawę wydajności maszyn i urządzeń, poprawę jakości wytwarzanych produktów,
- zwiększenie dostępności maszyn i urządzeń,
- stałą kontrolę nad maszynami i urządzeniami,
- uniknięcie zbędnych zakupów maszyn i urządzeń,
- zwiększenie zaangażowania wszystkich pracowników w opiekę nad maszynami i urządzeniami produkcyjnymi oraz współzawodnictwo między pracownikami odpowiedzialnymi za maszyny o lepszy wynik wskaźnika OEE.

Wraz z zastosowaniem wskaźnika jako sposobu wyrażania efektywności, konieczne jest podjęcie działań mających na celu kształtowanie efektywności na wymaganym poziomie. Po to by maksymalizować wskaźnik OEE potrzebna jest jak najmniejsza ilość awarii i przestojów. W przypadku gdy takie występują, jego wartość spada. Z tego powodu przedsiębiorstwa jako uzupełnienie danych prezentowanych przez OEE, określają też wskaźniki dotyczące niezawodności oraz konserwacji. Niezawodność jest mierzona za pomocą wskaźnika MTBF (*ang. mean time between failure*), oznaczającego średni czas pomiędzy awariami lub częstość awarii w określonym czasie.

$$MTBF = \frac{\text{Czas pracy}}{\text{Liczba awarii}} \quad (7)$$

Konserwacja wyrażana jest przez wskaźnik MTTR (*ang. mean time to repair*), oznaczający średni czas naprawy. Wskaźnik rozumiany jest, jako średni czas trwania naprawy od momentu zgłoszenia do momentu jej zakończenia [4].

$$MTTR = \frac{\text{Czas wykonanych napraw}}{\text{Liczba awarii}} \quad (8)$$

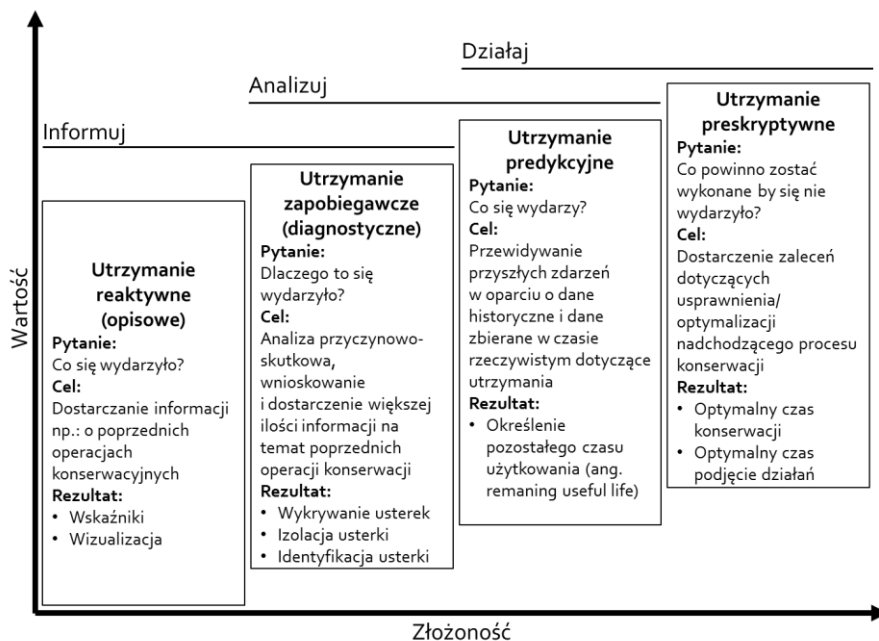
Stosując wskaźniki należy pamiętać o podstawowej zasadzie „garbage in, garbage out” (z ang.: wrzucisz śmieci, śmieci wyciągniesz). Wskaźnik stanowi przydatne narzędzie, jednak wiąże się z ryzykiem, uzyskany wynik jest na tyle wartościowy i miarodajny, na ile prawdziwe i wiarygodne były użyte do jego obliczenia dane [20]. Jeżeli brak jest właściwego zestawu danych do obliczenia wskaźnika, ze względu na ich jakość należy je uprościć. Biorąc to pod uwagę, do obliczeń wskaźników, najlepiej korzystać z systemów dziedzinowych produkcji, takich jak systemy zarządzania zasobami (*ang. enterprise resource planning, ERP*) czy systemów realizacji produkcji (*ang. manufacturing execution system, MES*). Systemy te ze względu na wymóg autentykacji i autoryzacji danego użytkownika uniemożliwiają modyfikację danych – co stanowi gwarancję wiarygodności danych wejściowych wskaźników [54].

### 2.2.2. Strategie utrzymania ruchu

Efektywność systemu wytwarzania zależy od przyjętej strategii i sposobu realizacji prac w zakresie utrzymania. Utrzymanie związane jest z szeregiem czynności konserwacji i monitorowania, do których należy: analizowanie stanu, rutynowa konserwacja, przeglądy, naprawa [65]. Za realizację tych prac odpowiedzialny jest dział utrzymania ruchu jak i wszyscy pracownicy. Działania w zakresie utrzymania ruchu maszyn dotyczą zapobieganiu strat związanych z nieplanowanymi przestojami powodowanymi awarią lub innym zdarzeniem uniemożliwiającym planową pracę. W przypadku wystąpienia nieplanowego przestoju koszty ponoszone są dwuwymiarowo zarówno w zakresie kosztu naprawy jak i kosztu opóźnień w realizacji produkcji. Koszt realizacji produkcji będzie odpowiedni do opóźnienia. W przypadku gdy element zamienny, który uległ uszkodzeniu i jest w magazynie części zamiennych – naprawa będzie realizowana natychmiast. W przeciwnym wypadku, gdy nie jest dostępny i wymaga sprowadzenia, całkowity czas naprawy znacząco się wydłuży. Wyłączenie maszyny z cyklu produkcyjnego zmniejsza możliwości realizacji obecnych i przyszłych zleceń, co wiąże się z kosztem utraconych możliwości. Przeciwdziałanie takim sytuacjom wiąże się z podejmowaniem skoordynowanych działań w ramach strategii utrzymania ruchu. Dzięki wdrożeniu strategii możliwe jest zmniejszenie kosztów awarii i obsługi serwisowej oraz czasu przestojów, jednocześnie wydłużając czas sprawnego działania urządzeń. Strategie obejmują różne działania, takie jak: przewidywanie awarii, diagnostyka awarii, wykrywanie awarii, klasyfikacja rodzaju awarii, rekomendacja działań naprawczych czy konserwacja po awarii. Do strategii utrzymania zalicza się [3]:

- utrzymanie reaktywne (*ang. reactive maintenance*) – strategia, w której spowolnienia i awarie usuwane są w momencie ich wystąpienia,
- utrzymanie zapobiegawcze (*ang. preventive maintenance*) – strategia, w ramach której konserwacja sprzętu odbywa się zgodnie z wcześniej zaplanowanym harmonogramem w celu wymiany lub konserwacji części przed ich awarią,
- utrzymanie predykcyjne (*ang. predictive maintenance*) – strategia, w ramach której monitorowane jest działanie urządzenia za pomocą czujników, a dane historyczne są analizowane w celu przewidzenia oczekującej awarii i rozwiązania problemu proaktywnie,
- utrzymanie preskryptywne (*ang. prescriptive maintenance*) – strategia, w ramach której działanie sprzętu jest stale monitorowane za pomocą czujników, a następnie dane są analizowane przez zaawansowane oprogramowanie w celu zaproponowania konkretnych czynności konserwacyjnych, które zapewniają optymalny czas pracy sprzętu. W szczególności konserwacja preskryptywna obejmuje modelowanie wiedzy eksperckiej, uczenie maszynowe, predykcyjną analizę danych i rozumowanie semantyczne w celu usprawnienia i automatyzacji procesów decyzyjnych. Optymalny wybór i zaproponowanie właściwych strategii, taktyk i planów działania w celu przewidywania i rozwiązywania problemów dotyczą danego systemu wytwarzania i poszczególnych maszyn. Utrzymanie preskryptywne wykorzystuje analizy opisowe, diagnostyczne i predykcyjne w celu zrozumienia przeszłych zdarzeń tak by przewidzieć prawdopodobieństwo przyszłych zdarzeń i potencjalny wpływ każdej decyzji dotyczącej utrzymania ruchu na system wytwarzania i powiązane procesy biznesowe.

Strategie utrzymania ruchu klasyfikowane są za pomocą kryteriów złożoności ich implementacji i oczekiwanej wartości dla przedsiębiorstwa (Rys. 6). Podjęcie decyzji, jaka strategia będzie optymalna dla danego przedsiębiorstwa zależy od pytania na jakie w perspektywie utrzymania przedsiębiorstwo chce uzyskać odpowiedź. Forma odpowiedzi określona jest przez rezultat przyjęcia danej strategii. Przyjęta strategia będzie rekomendowała zestaw działań zmierzających do zapewnienia informacji, przeprowadzenia analizy czy też rekomendacji działań.



Rys. 6. Strategie utrzymania a złożoność i wartość [43], [39]

Podstawą realizacji strategii utrzymania są dane diagnostyczne maszyn i danego procesu technologicznego. Wykorzystywane są zarówno dane pozyskane w czasie pracy maszyny, jak i dane historyczne. W przypadku systemu wytwarzania agregacja danych zależy od rodzaju parku maszynowego. Dla maszyn sterowanych numerycznie (*ang. computerized numerical control, CNC*) oraz programowalnych sterowników logicznych (*ang. programmable logic controller, PLC*) możliwe jest przechwycenie danych z wewnętrznej pamięci urządzeń. Problem pojawia się w momencie transferu i przechowywania [89].

Realizowana strategia przedsiębiorstwa w ramach utrzymania jest ściśle powiązana z poziomem wskaźnika OEE danego systemu wytwarzania. Szacuje się, że wdrożenie strategii utrzymania reaktywnego zapewnia OEE na maksymalnym poziomie 50% efektywności systemu, utrzymanie zapobiegawcze pozwala poprawić ten wynik do poziomu 50–75%. Utrzymanie predykcyjne zapewnia poziom 75–90%, a przy utrzymaniu preskryptywnym wskazywany jest 90% poziom efektywności systemu [86]. Proponując działania w ramach danej strategii oraz stosując usprawnienia w obszarze dostępności, wydajności czy jakości, wpływa się bezpośrednio na poprawę systemu wytwarzania.

Efekty realizacji strategii w ramach systemu wytwarzania podlegają weryfikacji zarówno w zakresie kontroli jakości, ale przede wszystkim są oceniane przez klienta. Klient jest finalnym weryfikatorem działania systemu wytwarzania. Z jego perspektywy, typowo nie jest ważne to przy pomocy jakich

i jak bardzo zaawansowanych technologii wykonywany jest produkt. Klient nie jest szczególnie zainteresowany tym jacy pracownicy (kwalifikacje, umiejętności) odpowiadają za proces produkcji. To, co w pierwszym momencie interesuje go to kwestia czy zakupiony produkt spełnia jego wymagania i oczekiwania. Klient korzystając z produktu utożsamia go nie tyle z wynikiem działania systemu wytwarzania, co z efektem działania przedsiębiorstwa [81].

### **2.2.3. Podsumowanie**

Podsumowując, pojęcie efektywności jest definiowane na wiele różnych sposobów w odniesieniu do różnych aspektów działalności przedsiębiorstwa. Na gruncie produkcji efektywność wyraża się ściśle zdefiniowanymi wskaźnikami. Przedsiębiorstwo określa je w zależności od swoich potrzeb jak i adaptuje te powszechnie stosowanie. W rezultacie określone wskaźniki odnoszą się do najważniejszych obszarów danej produkcji. Monitorując określone aspekty i obliczając wskaźniki możliwa jest ciągła kontrola produkcji w zakresie efektywności. Wykorzystanie wskaźników zależy od przyjętej strategii utrzymania. Obliczanie wskaźników w pierwszej kolejności jest częścią strategii reaktywnej.

Dysponując wskaźnikami i wdrażając strategię można kształtować i zapewnić efektywność systemu wytwarzania – jest to narzędzie wewnętrznej poprawy. Wskaźniki stanowią wewnętrzne miary, dzięki którym przedsiębiorstwo zdobywa informacje na ile wykorzystuje swoje zasoby.

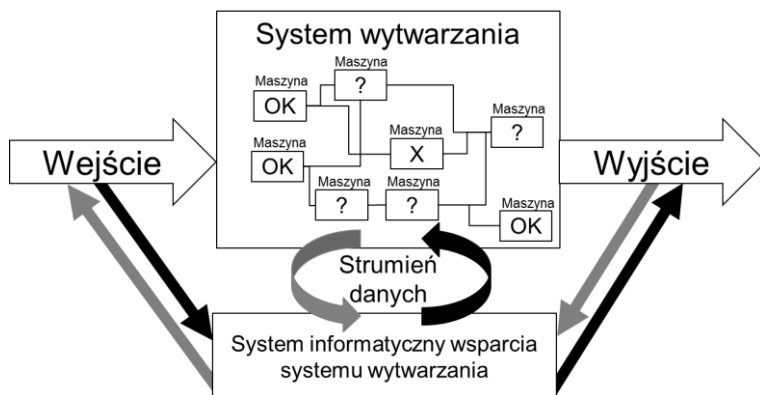
## **2.3. Nowe technologie informatyczne wsparcia systemów wytwarzania**

Zastosowanie technologii informatycznych w pracy przedsiębiorstwa produkcyjnego pozwala na wyeliminowanie wielu pomyłek jak i prowadzenie działalności zarówno w małej jak i dużej skali.

W przedsiębiorstwie produkcyjnym systemy informatyczne wspierają planowanie, kontrolę, utrzymanie ruchu, sterowane na każdym poziomie działalności, od poziomu taktycznego po zarządczy. Systemy informatyczne dzięki ich modułowej budowie umożliwiają przepływ informacji wewnątrz organizacji jak i na zewnątrz – do jej partnerów. W swoim działaniu systemy informatyczne korzystają i implementują metody o charakterze obliczeniowym (matematycznym, informatycznym) czy organizacyjnym (zarządczym) [116].

Podstawą implementacji metod jest dostępność danych odnoszących się do systemu wytwarzania. Zadaniem systemu informatycznego jest ich przetwarzanie w celu umożliwienia podjęcia decyzji adekwatnie do dynamicznie zmieniającego się stanu i statusu systemu wytwarzania (Rys. 7). Przyjmuje się, że stan systemu odpowiada na diagnostyczne pytanie czy system działa poprawnie (adekwatnie do

oczekiwań) czy też nie [67]. Natomiast status odnosi się do stwierdzenia czy dany system wytwarzania działa bądź też nie.



Rys. 7. Model wsparcia systemu wytwarzania przez system informatyczny  
Źródło: Opracowanie własne

Mechanizmy zarządzania muszą odpowiadać zmieniającym się wymaganiom otoczenia jak i wewnętrznemu stanowi systemu wytwarzania. Podstawą do reakcji jest sprzężenie zwrotne. Dzięki temu mechanizmowi, zarządzający mają możliwość oceny skutków podjętej decyzji. Sprzężenie zwrotne daje możliwość miary dokonanej zmiany jak i weryfikacji jej wyników. W przypadku, gdy dokonane zmiany nie przyniosły pożądanych efektów należy ich zaniechać, w przeciwnym wypadku należy je kontynuować. Im lepsza i pełniejsza informacja o statusie i stanie systemu wytwarzania tym lepsze decyzje można podjąć. Wraz z rozwojem technologii informatycznych opracowano wiele rozwiązań, które znacząco usprawniają przepływ i pozyskiwanie informacji. To otwiera perspektywę dla wielu zastosowań w zakresie monitorowania i kontroli systemów wytwarzania. Stanowi też podstawę rozwoju nowoczesnych systemów informatycznych wsparcia systemu wytwarzania – szczególnie w obszarze poprawy efektywności systemów wytwarzania. Do tych technologii zalicza się:

- internet przedmiotów (*ang. internet of things, IoT*),
- wielowymiarowe zbiory danych (*ang. big data*),
- systemy cyber-fizyczne (*ang. cyber-physical systems, CPS*),
- chmura obliczeniowa (*ang. cloud computing, CC*),
- mgła obliczeniowa (*ang. fog computing, FG*),
- cyfrowy bliźniak (*ang. digital twin, DT*),
- sztuczna inteligencja (*ang. artificial intelligence, AI*).

Zastosowania tych nowoczesnych technologii na gruncie systemów wytwarzania określa się mianem czwartej rewolucji przemysłowej bądź też w skrócie przemysłem 4.0 (*ang. industry 4.0*). W poniższych podrozdziałach

szczegółowo przybliżona została charakterystyka wymienionych technologii jak i zagadnienie przemysłu 4.0.

### 2.3.1. Internet przedmiotów

Internet przedmiotów to technologia, która współcześnie ma znaczący wpływ na życie ludzkie w różnych aspektach, ekonomicznych, zdrowotnych, technicznych i społecznych. Internet przedmiotów to sieć informacyjna obejmująca obiekty fizyczne (czujniki, maszyny, samochody, budynki i inne obiekty), która umożliwia interakcję i współpracę tych obiektów w celu osiągnięcia wspólnych celów [40]. Internet przedmiotów definiowany jest też jako wzajemne połączenie unikatowych wbudowanych urządzeń komputerowych. Możliwe jest połączenie dowolnych urządzeń w ramach sieci internet [75].

Termin internet przedmiotów pierwszy raz został użyty przez Kevina Ashtona w 1999 roku w prezentacji Procter & Gamble (P&G) zatytułowanej „Internet of Things”. Ashton zaproponował wykorzystanie transmisji danych przez internet z wykorzystaniem RFID (*ang. radio-frequency identification*), do sterowania łańcuchem dostaw w P&G [32]. Termin internet przedmiotów występuje też pod nazwą internet rzeczy. Przy czym różnica wynika tylko z tłumaczenia, oba terminy odnoszą się do tego samego zagadnienia. Współcześnie obszar zastosowań tej technologii rozszerza się i jest wykorzystywany w nowych obszarach. Dotychczas technologia ta znajduje zastosowanie w [68]:

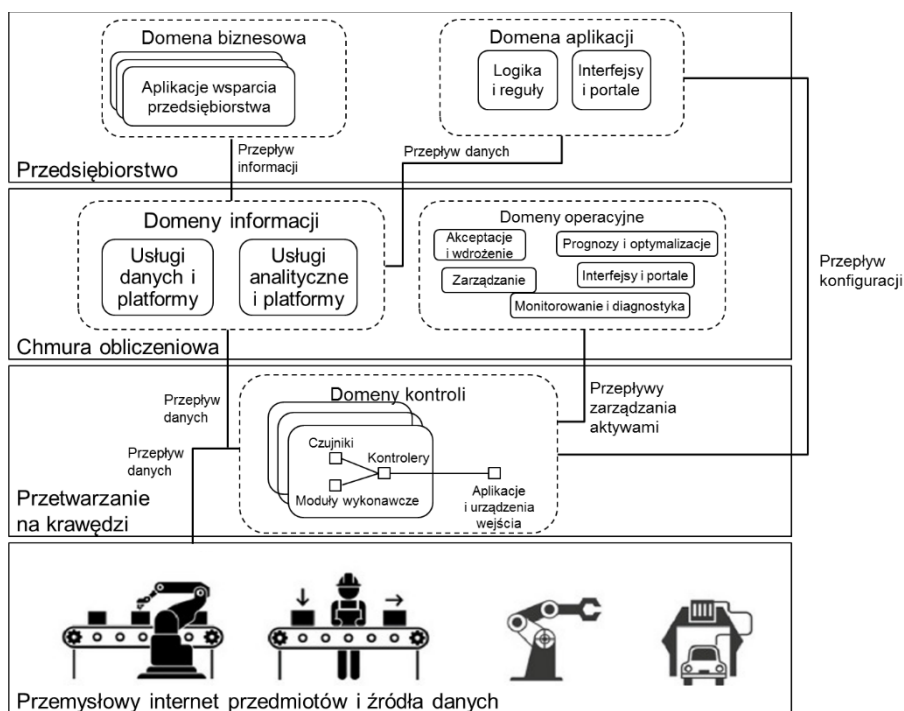
- sprzętach AGD i multimedialnych,
- inteligentnych domach,
- systemach bezpieczeństwa,
- telemedycynie,
- marketingu w handlu detalicznym,
- systemach produkcyjnych,
- logistyce,
- hodowli i uprawach roślin.

Istotą technologii internetu przedmiotów jest możliwość uzyskiwania danych o stanie unikalnych obiektów w wybranym czasie (rzeczywistym bądź zbliżonym rzeczywistemu). Stan ten może być wyrażony przez temperaturę, drgania, lokalizację, położenie, czy inne wybrane parametry ze względu na charakterystykę monitorowanego systemu. To jakie dane są pozyskiwane zależy wyłącznie od potrzeb, a także od granulacji obserwowanych obiektów. Pozyskiwanie danych może być prowadzone w celu obserwacji parametrów przepływu części na linii produkcyjnej jak i przemieszczania kontenerów w porcie przeładunkowym. Dzięki temu możliwy jest zapis i analiza wybranych parametrów. To w perspektywie produkcji, umożliwia natychmiastową reakcję

w przypadku wystąpienia przestojów lub zidentyfikowania innych problemów charakteryzowanych przez pobrane stany parametrów [90].

Urządzenia IoT mają możliwość przetworzenia sygnałów z czujnika na dane. W zależności od potrzeb urządzenie IoT może odbierać i przetwarzać lokalnie wybrane dane. W roli urządzeń IoT mogą występować zarówno proste układy elektroniczne jak i zaawansowane urządzenia. Do implementacji rozwiązań IoT stosuje się znaczniki RFID czy rozwiązania korzystające z technologii BLE (*ang. bluetooth low energy*) [121] lub bardziej zaawansowane układy w formie mikrokontrolerów [86].

Z technologią internetu przedmiotów związane jest zagadnienie przemysłowego internetu przedmiotów (*ang. industrial internet of things, IIoT*). Jak wskazuje nazwa przemysłowy Internet rzeczy stanowi dedykowane rozwiązanie Internetu przedmiotu, dla przemysłu. IIoT skupia się na procesach produkcyjnych, na zarządzaniu aktywami, utrzymaniu, monitorowaniu czy kontroli. Rolą tej technologii jest agregacja danych na temat środków produkcji w czasie rzeczywistym. Tak pozyskane dane są podstawą do realizacji działań utrzymania i konserwacji (predykcja awarii) jak i weryfikacji efektywności systemu produkcji. IIoT stanowi podstawę dla zapewnienia cyfrowego sprzężenia zwrotnego dla procesów zarządzania produkcją.



Rys. 8. Ogólna architektura systemów IIoT [66]

IIoT pozwala monitorować system produkcyjny nawet w tych obszarach, gdzie nie występują cyfrowe układy sterowania i kontroli: tradycyjne obrabiarki, środki transportu czy produkcja w toku.

W roku 2017 Industrial Internet Consortium przedstawiło raport na temat referencyjnej architektury systemów opartych o przemysłowy internet przedmiotów (Rys. 8) [66]. Architektura zakłada, że urządzenia IIoT i przemysłowe źródła danych generują ciągle strumienie danych, podczas gdy rozwiązania przetwarzania na krawędzi i systemy chmury obliczeniowej służą zapewnieniu środowiska przetwarzania zgromadzonych danych przez aplikacje domenowe. Architektura przedstawia przepływ danych, informacji, konfiguracji pomiędzy różnymi warstwami. Autorzy raportu przyznają, że badacze postrzegają architekturę systemów IIoT odmiennie, biorąc pod uwagę różnice projektowe w zakresie lokalizacji, założeń komunikacyjnych, zadań obliczeniowych, założeń realizacji czy systemów zarządzania zasobami, bezpieczeństwa, ochrony bądź prywatności. Przewiduje się, że zastosowanie IIoT doprowadzi do powstania autonomicznych w pełni zautomatyzowanych systemów wytwarzania, które będą w stanie wymieniać dane.

### 2.3.2. Big data

Zastosowanie IoT na gruncie produkcji umożliwia przejście od tradycyjnych systemów wytwarzania do nowoczesnych, cyfrowych systemów. Wiąże się z tym znaczący wzrost ilości pozyskiwanych danych. Wraz z rozwiązaniami internetu przedmiotów coraz więcej urządzeń, narzędzi, zakładów, pojazdów, a także urządzeń jest wyposażonych w czujniki będące źródłem danych. Tak duży wolumen danych tworzy wielowymiarowy zbiór, który w dziedzinie technologii informatycznych określa się mianem Big Data. W perspektywie przemysłu mówi się, o przemysłowym wielowymiarowym zbiorze danych, którego zadaniem jest przechowywanie danych systemów wytwarzania [77].

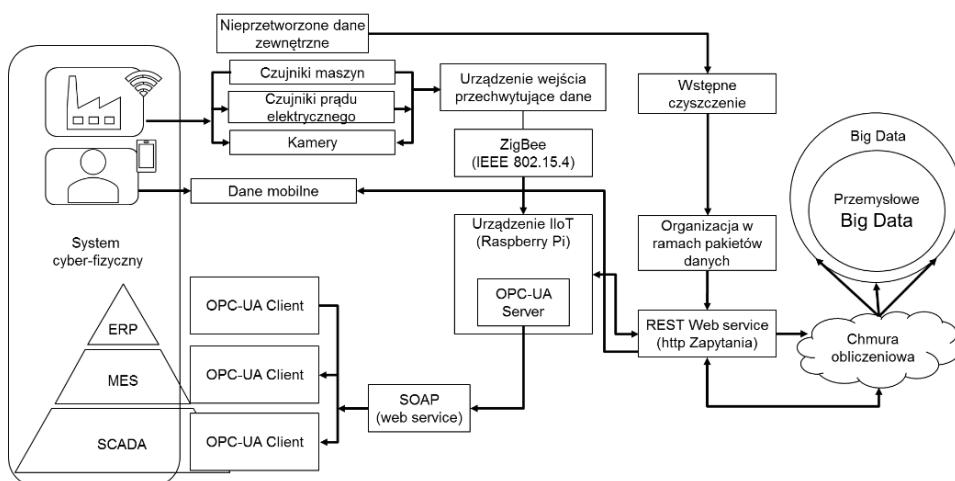
Wielowymiarowe zbiory danych opisuje za pomocą definicji ich kolejnych wymiarów, które w podstawowym ujęciu 3V opisywane są następująco:

- wolumen (*ang. volume*) odnosi się do dużej ilości danych. Dane agregowane mają rozmiary tera, peta a nawet eksabajtów,
- różnorodność (*ang. variety*) odnosi się do dużej ilości typów danych (lokalizacja, muzyka, wideo, obraz, szeregi czasowe sygnałów, i inne).
- prędkość (*ang. velocity*) odnosi się do dużej szybkości przetwarzania danych, która jest najbardziej wyróżniającą się cechą w stosunku do tradycyjnej bazy danych.

Wymiary te zostały zdefiniowane przez analityka Laneya Doug w publikacji badawczej Gartner META Group z 2001 roku [58]. Do powyżej listy dodaje się też dwa dodatkowe wymiary, określając w ten sposób 5V:

- zmienność (*ang. variability*) odnosi się do zmiany zakresu wartości danych. Ponieważ wielowymiarowe zbiory danych mogą obejmować pełen zakres doświadczeń ludzkich i maszynowych, zawsze wykazują większą zmienność niż tradycyjne zbiory danych,
- wartość (*ang. value*) odnosi się do niskiej gęstości i wysokiej wartości całkowitej rozwiązań wielowymiarowych zbiorów danych. Wśród dużej ilości danych, tylko niewielka część informacji jest użyteczna. Metody analizy danych służą wyodrębnieniu zawartych w danych wartości [64].

W przemysłowym wielowymiarowym zbiorze danych, agregowane dane są generowane na poziomie wykonawczym bezpośrednio przez obrabiarki jak i operatorów. Dane przemysłowe mają duże znaczenie dla przedsiębiorstwa, ponieważ mogą być wykorzystywane i analizowane w celu dostarczenia istotnych informacji dla zarządczego poziomu przedsiębiorstwa. Schemat zastosowania przemysłowego wielowymiarowego zbioru danych na gruncie systemów wytwarzania przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Przemysłowy wielowymiarowy zbiór danych generowany z wykorzystaniem IIoT [77]

Na powyższym schemacie wskazane są źródła danych, czyli czujniki maszyn jak i systemy dziedziny SCADA, MES, ERP przedsiębiorstwa. Z wykorzystaniem protokołów transferu danych ZigBee dane trafiają do urządzenia IIoT skąd za pomocą protokołu OPC-UA gromadzone są w systemach dziedziny. Urządzenie IIoT przekazuje dane do systemu przemysłowego wielowymiarowego zbioru danych zarządzanego z poziomu chmury obliczeniowej. Oprócz danych produkcyjnych w przemysłowym zbiorze

przechowywane są także dane zewnętrzne, ważne z perspektywy produkcji. Do tych danych zalicza się dane zamówień, dane kontrahentów, dane reklamacji produktów i inne.

Rozwiązania przemysłowego wielowymiarowego zbioru danych znajdują swoje zastosowanie w rozwiązaniach systemów cyklu życia produktów (*ang. product lifecycle management, PLM*). Z wykorzystaniem Big Data gromadzone są dane dotyczące produktu z fazy projektowania, fazy produkcji. Następnie w czasie użytkowania produktu system agreguje dane dotyczące jego użytkowania (awarie, czas użytkowania) i w końcu gromadzone są informacje dotyczące utylizacji produktu.

### 2.3.3. Chmura obliczeniowa

Technologią informatyczną zapewniającą przetwarzanie danych zagregowanych przez rozwiązania IIoT jest technologia chmury obliczeniowej (*ang. cloud computing, CC*). Z definicji chmura obliczeniowa to model udostępniania mocy obliczeniowej umożliwiający użytkownikowi wygodny dostęp (na żądanie) do puli konfigurowalnych zasobów obliczeniowych (sieci, serwerów, pamięci masowych, aplikacji i usług), które mogą być szybko zarówno zarezerwowane jak i zwolnione zdalnie przez użytkownika. Model wspomaga dostępność zasobów i składa się z pięciu podstawowych cech, trzech usług modeli oraz czterech modeli wdrażania [73].

Dostęp „na żądanie” do puli konfigurowalnych zasobów obliczeniowych pozwala by wykorzystywać chmurę dynamicznie, czyli odpowiednio do zmieniających się potrzeb. To pozwala na zaoszczędzenie znaczących środków związanych z samodzielnym utrzymaniem i zapewnieniem mocy obliczeniowych. Chmura obliczeniowa jako rozwiązanie dostarczana jest w formie usługi. Wyróżnia się trzy podstawowe kategorie usług w chmurze obliczeniowej [25]:

- infrastruktura jako usługa (*ang. infrastructure as a service, IaaS*), która jest najniższą warstwą w infrastrukturze chmury i oferuje pulę maszyn wirtualnych dla przetwarzania i przechowywania,
- platforma jako usługa (*ang. platform as a service, PaaS*) jest warstwą, która umożliwia wdrażanie platform do uruchamiania aplikacji,
- oprogramowanie jako usługa (*ang. software as a service, SaaS*), warstwa, która zapewnia dostęp do aplikacji i usług poziomu użytkownika, najczęściej przez przeglądarkę internetową.

Technologia chmury obliczeniowej, znalazła zastosowanie nie tylko w obszarze wsparcia infrastruktury informatycznej przedsiębiorstwa. Dostrzeżono także możliwości jej wykorzystania w innych obszarach, takich jak na przykład wytwarzanie. W skutek czego wyodrębniono chmurę wytwarzania (*ang. cloud manufacturing, CM*). Chmura wytwarzania to rozwiązanie klasy

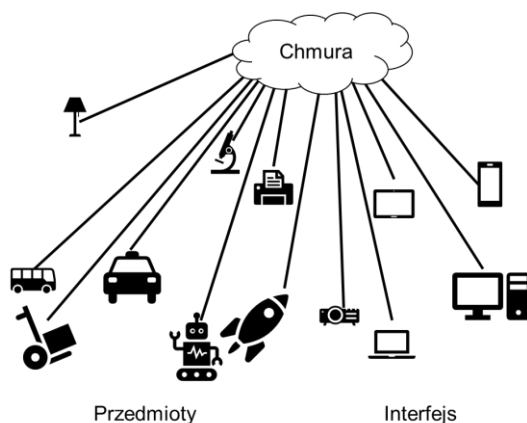
chmury obliczeniowej, gdzie wszystkie zasoby informatyczne i oprogramowanie wsparcia produkcji dostarczone są do użytkownika w modelu usługi.

Chmura wytwarzania stanowi dedykowane produkcji wyspecjalizowane rozwiązanie, w którym użytkownicy mogą zamówić usługi wsparcia produkcji w zakresie projektowania, produkcji, nadzorowania, nadzorowania dokumentacji, rozliczania, testowania czy zarządzania zasobami ludzkimi. Usługi odnoszące się do każdego etapu cyklu życia produktu [107]. Wykorzystując rozwiązania chmury wytwarzania, przedsiębiorstwo płaci tylko opłatę za użytkowanie. Całość kwestii związanych z utrzymaniem infrastruktury jest regulowana prawnie z wykorzystaniem umowy definiującej jakość świadczonych usług SLA (*ang. service licence agreement*). W przeciwieństwie do rozwiązań chmury obliczeniowej, która oblicza i przetwarza dane dla użytkownika. Chmura wytwarzania ma za zadanie obliczać dane by tworzyć produkty [79]. To nowe podejście do wytwarzania opiera się na tak zwanej koncepcji DAMA (*ang. design anywhere, manufacture anywhere*) [1], czyli „projektuj gdziekolwiek i produkuj gdziekolwiek”. Realizacja tego konceptu wymaga zdolności łatwej wymiany danych projektowych i produkcyjnych pomiędzy wieloma zdalnymi obiektami. Założenia DAMA pomagają w tworzeniu efektywnych połączeń pomiędzy systemami planowania produkcji, systemami zarządzania zasobami i relacjami z klientami, bez względu na ograniczenie geograficzne czy infrastrukturalne. W zasadzie tam, gdzie jest dostępna sieć internet możliwe jest realizowanie zadań dla produkcji danego przedsiębiorstwa.

#### **2.3.4. Mgła obliczeniowa**

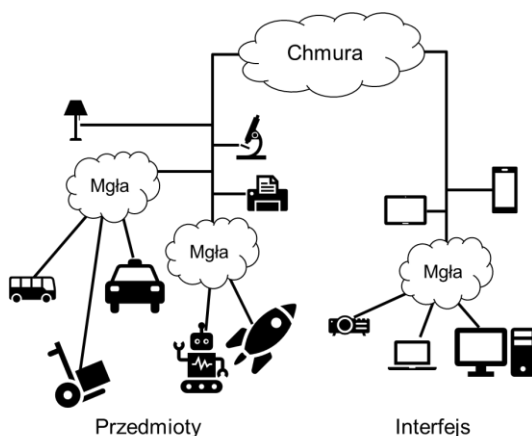
W związku z rozwojem rozwiązań chmury obliczeniowej pojawiło się pytanie czy wszystkie informacje generowane przez poziom IoT muszą być przesyłane do chmury. Pytanie to wynika z faktu, że oprócz istotnych urządzenia IoT przesyłają dodatkowe meta dane. Ten typ danych jest istotny w zakresie prac serwisowych, choć zajmują miejsce i transfer. To przekłada się na sytuację, gdy wraz ze wzrostem urządzeń komunikujących się z chmurą znacząco wzrasta ruch sieciowy (Rys. 10). Z tego powodu zaproponowano przetworzenie części danych już na krawędzi sieci internet. Jako krawędź należy rozumieć sieć lokalną – najbliższą miejscu pozyskiwania danych. Tak rozwinęła się kolejna technologia, wspierająca implementację chmury obliczeniowej, określana mianem mgły obliczeniowej (*ang. fog computing, FC*) [9], bądź przetwarzaniem na krawędzi (*ang. edge computing, EC*) [80].

Mgła przetwarzania to technologia, która zapewnia usługi obliczeniowe, usługi przechowywania, usługi sieciowe pomiędzy urządzeniami końcowymi i centrami przetwarzania danych w chmurze. Mgła to pośrednik, który wysyła do poziomu chmury krytyczne dane.



Rys. 10. Chmura obliczeniowa a IoT  
Źródło: Opracowanie własne

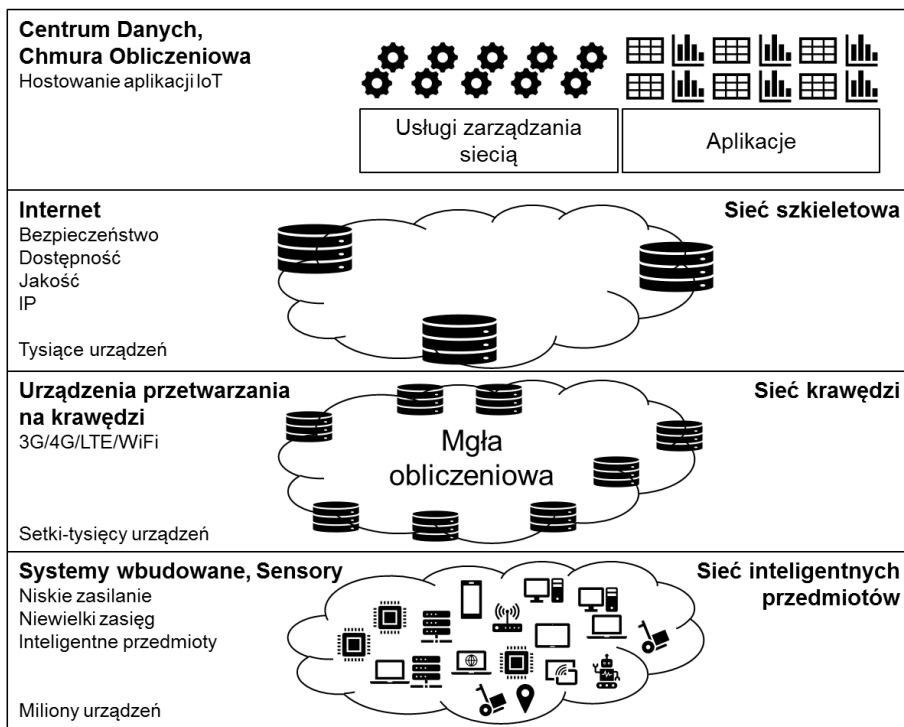
Operacje, które nie wymagają obliczeń zaawansowanych algorytmów (na przykład sztucznej inteligencji, SI), mogą zostać wykonane lokalnie, co ilustruje rysunek 11.



Rys. 11. Zastosowanie mgły obliczeniowej  
Źródło: Opracowanie własne

Rolę mgły obliczeniowej ilustruje architektura informacyjna i obliczeniowa wspierająca aplikacje IoT (Rys. 12) [2]. Architektura ta wyłoniona została w związku z narastającym wyzwaniem, jakim jest wzrost ilości danych generowanych przez miliony nowych podłączonych urządzeń w zakresie inteligentnych pojazdów, autonomicznych samochodów, inteligentnych miast i przemysłowego internetu przedmiotów. Ze względu na efekt skali, nawet przy rozwiązaniu chmury obliczeniowej, ważne staje się to, co jest wysyłane i przetwarzane w chmurze. Przetwarzanie danych na skraju sieci, gdzie

podłączone urządzenia pozyskują dane dając możliwość tworzenia nowych i innowacyjnych usług [9]. Ma to szczególne znaczenie w przypadku nadzorowania czy też sterowania procesami krytycznymi (na przykład sterowanie samochodem), które wymagają przetwarzania w czasie rzeczywistym w wymiarze milisekund i nie mogą być uzależnione od dostępności internetu na danym obszarze geograficznym. Ideą mgły nie jest zastąpienie chmury, ale udoskonalenie jej systemu poprzez zapewnienie, że krytyczne dane są dostępne w miejscach, w których mogą one wnieść największą wartość dodaną.



Rys. 12. Architektura przetwarzania chmura i mgła obliczeniowa [9]

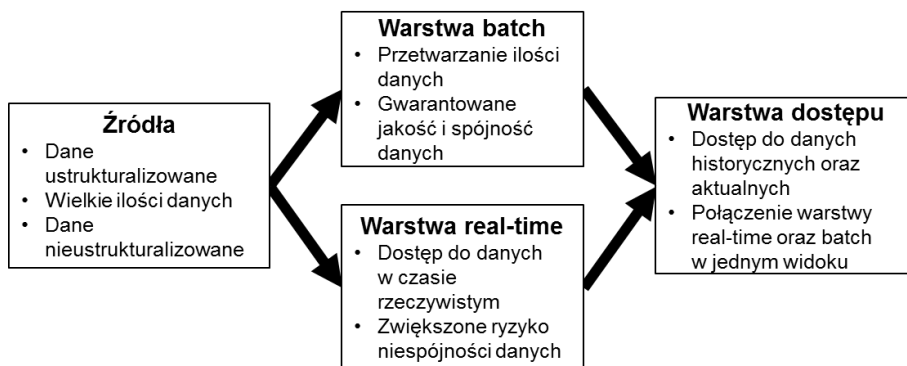
Podsumowując, architektura przetwarzania we mgle może pomóc w zapewnieniu wymaganego determinizmu i wydajności „na krawędzi” poprzez zmniejszenie opóźnień i poprawę jakości usług. Mgła uzupełnia chmurę, a nie ją zastępuje. Wykorzystanie chmury wiąże się z ekonomicznymi korzyściami, których mgła nie zapewni. Zatem model chmury jest krytyczny dla nowych architektur aplikacji. Z drugiej strony, mgła kwestionuje model chmury jako uniwersalny i jedyny sposób dla zapewnienia mocy obliczeniowej aplikacji opartych na rozwiązaniach internetu przedmiotów [90].

### 2.3.5. Systemy cyber-fizyczne

Systemy cyber-fizyczne (*ang. cyber-physical systems, CPS*) realizują ścisłą integrację warstwy obliczeń i obiektów takich jak procesy, układy, maszyny. Ich zadaniem jest odwzorowanie w warstwie cyfrowej fizycznych obiektów, będących przedmiotem monitorowania, sterowania i kontroli. Takie odwzorowanie ma usprawnić realizację cyfrowego sprzężenia zwrotnego, gdzie właściwie do danych charakteryzujących obiekt, na poziomie cyfrowego odwzorowania realizowana jest funkcja sterowania, monitorowania czy kontroli. Systemy cyber-fizyczne występują w formie systemów wbudowanych oraz modeli zaimplementowanych w wysokim języku programowania [59]. Systemy te wyewoluowały z systemów wbudowanych i są oparte na ścisłej współpracy kombinacji elementów obliczeniowych, które kontrolują obiekty fizyczne [19].

Rozwiązania CPS są wykorzystywane we wdrażaniu systemów cyber-wytwarzania (*ang. cyber-manufacturing systems, CMS*) [60]. CMS wspiera system wytwarzania na bazie analizy strumieni danych IIoT. CMS w celu zapewnienia sprzężenia zwrotnego wykorzystuje architektury przetwarzania danych w czasie rzeczywistym – Lambda [30] i Kappa [41].

Architektura Lambda jest architekturą przetwarzania danych zaprojektowaną w celu przetwarzania dużych ilości danych z wykorzystaniem zarówno metod przetwarzania wsadowego (*ang. batch processing*), jak i strumieniowego (*ang. stream processing*) (Rys. 13). Takie podejście do architektury próbuje zrównoważyć opóźnienia, przepustowość i tolerancję na błędy, wykorzystując przetwarzanie wsadowe w celu zapewnienia widoków danych wsadowych, a jednocześnie wykorzystując przetwarzanie strumieniowe w czasie rzeczywistym w celu zapewnienia widoków danych online [122].



Rys. 13. Architektura Lambda [122]

Obie architektury pozwalają na analizę danych produkcyjnych w czasie rzeczywistym. Natomiast w porównaniu z architekturą Lambda, architektura Kappa jest prostsza w implementacji, ponieważ posiada tylko jedną warstwę

przetwarzania i jest tworzona wyłącznie w celu przetwarzania strumieni danych. Z tego powodu jej utrzymanie i usuwanie błędów zabiera mniej czasu i jest prostsze [5].



Rys. 14. Architektura Kappa [123]

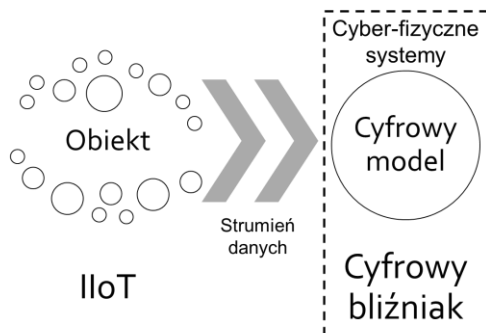
Architektura Kappa ogłoszona została jako odpowiedź na krytykę związaną z implementacją oraz utrzymaniem systemów opartych o architekturę Lambda. Kappa nie zastępuje Lambdy, gdyż Kappa stanowi odmienne podejście do przetwarzania. Architektura Kappa opiera się na czterech głównych założeniach:

- wszystko jest strumieniem – strumień stanowi nieskończoną ilość skończonych paczek danych, każdy rodzaj źródła danych może być uważany za strumień,
- dane są niezienne – dane nieprzetworzone są przechowywane w oryginalnej postaci i nie zmieniają się, dzięki czemu w każdej chwili można ich użyć ponownie,
- wykorzystanie jednego silnika do analizy danych zamiast kilku, jak w przypadku architektury Lambda,
- możliwość odtworzenia stanu danych – kalkulacje i ich rezultaty mogą być odświeżane przez odtwarzanie danych historycznych i aktualnych bezpośrednio z tego samego strumienia danych w każdym momencie.

Tak jak w architekturze Lambda, Kappa posiada warstwę przetwarzania w czasie rzeczywistym i warstwę dostępu, które pełnią tę samą funkcję. Natomiast brak jest warstwy przetwarzania wsadowego, która stała się zbędna ponieważ historię można w każdej chwili odtworzyć ze strumienia danych w warstwie dostępu przy pomocy identycznego silnika przetwarzania danych [123].

Zastosowanie rozwiązań CMS pozwala by na gruncie systemów wytwarzania wykorzystać IIoT tam, gdzie konieczne jest wykorzystanie sygnałów z czujników i urządzeń pomiarowych rozmieszczonych w halach produkcyjnych. Z tego powodu w literaturze pojawia się rosnąca ilość publikacji [28], [31], [33], [76],

[115], która zwraca uwagę na te pojęcia i proponuje nowe rozwiązania. Takim rozwiązaniem, które powstało na bazie rozwiązań CMS jest cyfrowy bliźniak (Rys. 15). Cyfrowy bliźniak jest kompleksową cyfrową reprezentacją pojedynczego obiektu (procesu, systemu, narzędzia, maszyny) [87]. Obiekt rzeczywisty odwzorowywany jest za pomocą szeregu charakteryzujących go danych. Koncepcja ta jest realizowana by odwzorować i być w stanie sterować, monitorować i kontrolować różne obiekty takie jak maszyny, procesy, czy też systemy, ale też poszczególne narzędzia [11].



Rys. 15. Cyfrowy bliźniak  
Źródło: Opracowanie własne

Obiekt może zostać odwzorowany zarówno w postaci modelu numerycznego i modelu trójwymiarowego. Zachowanie obiektu rzeczywistego, wyrażone jest przez dostosowane algorytmy. Połączenie modelu cyfrowego z realnymi danymi pozwala nie tylko na sterowanie, ale także predykcję przyszłych właściwości. Cyfrowy bliźniak rozwijany jest obok obiektu i pozostaje jego wirtualnym odpowiednikiem [34], [95].

### 2.3.6. Sztuczna inteligencja

Pojęcie sztucznej inteligencji (*ang. artificial intelligence, AI*) powstało już w połowie XX wieku. Natomiast dopiero na początku XXI wieku wyniki badań z zakresu sztucznej inteligencji znalazły powszechne zastosowanie w urządzeniach automatyki przemysłowej, w medycynie, wojskowości czy zarządzaniu finansami. Przedmiotem badań sztucznej inteligencji jest zarówno odkrywanie reguł rządzących inteligentnymi zachowaniami człowieka jak i wykorzystanie ich do tworzenia algorytmów programów komputerowych w celu realnych zastosowań. Sztuczna inteligencja podobnie jak inżynieria produkcji jest interdyscyplinarną dziedziną wiedzy i łączy w sobie zagadnienia informatyki, psychologii, matematyki, elektroniki, neurofizjologii czy filozofii.

W aspekcie technicznym sztuczna inteligencja przyjmuje postać komputerowych baz wiedzy i faktów oraz algorytmów, które znajdują

zastosowanie w zakresie rozpoznawania obrazów, mowy czy poszukiwaniu rozwiązań. Do metod sztucznej inteligencji zalicza się sieci neuronowe (maszynowe uczenie) czy algorytmy genetyczne [88]. Przy czym skuteczne zastosowanie tych metod zależy od dysponowania zestawem danych wzorcowych (uczących). Danych w pełni obrazujących dane zjawisko.

Zastosowanie sztucznej inteligencji w ramach przemysłu określa się mianem przemysłowej sztucznej inteligencji (*ang. industrial artificial intelligence, IAI*) [61]. Cechy tej technologii przedstawia się za pomocą skrótu „ABCDE”, który rozwija się następująco: technologia analityczna (*ang. analytics, A*), technologia wielowymiarowych zbiorów danych (*ang. big data, B*), chmura obliczeniowa bądź technologia cybernetyczna (*ang. cloud, cyber, C*), know-how domeny (*ang. domain, D*) i dowód, czyli dane wzorcowe (*ang. evidence, E*). Technologia Big Data i chmura obliczeniowa są niezbędnymi elementami, które zapewniają dane i platformę przetwarzania. Know-how domeny jest podstawą proponowania rozwiązań przemysłowej sztucznej inteligencji, gdyż zapewnia zrozumienie [61]:

- problemu i skoncentrowanie metod na jego rozwiązaniu,
- systemu wytwarzania, aby można było gromadzić właściwe dane o odpowiedniej jakości,
- atrybutów systemu wytwarzania i ich związku z właściwościami fizycznymi systemu lub procesu.

Dane wzorcowe są niezbędnym elementem tworzenia i weryfikacji modeli przemysłowych AI. Powiększając bazę danych wzorcowych możliwa jest ciągła poprawa danego modelu, by z upływem czasu stawał się on coraz bardziej dokładny, kompleksowy i niezawodny [61].

Implementacja rozwiązań przemysłowej sztucznej inteligencji stanowi odpowiedź na wymagania jakie stawiane są przed systemami wytwarzania i dostępność nowych technologii informatycznych. Dzięki przemysłowej AI pojawia się możliwość zaspokojenia potrzeb związanych z autonomicznością systemu wytwarzania wyrażaną samo-świadomością, samo-optimizacją, predykcją czy odpornością na zdarzenia niepożądane [61].

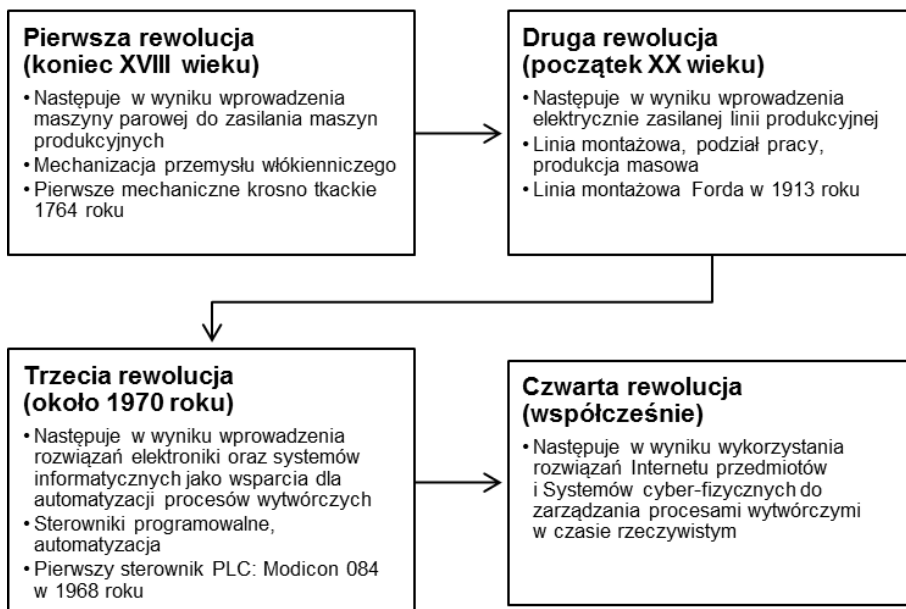
### **2.3.7. Przemysł 4.0**

Nowe rozwiązania systemów informatycznych przynoszą nowe możliwości rozwiązań dla wielu różnych problemów. Zastosowanie tych technologii w obszarze systemów wytwarzania i produkcji przyjęto określać mianem czwartej rewolucji przemysłowej bądź skrótowo przemysł 4.0.

Przemysł 4.0 powstał jako strategiczna inicjatywa rządu niemieckiego, która została przyjęta w ramach „Planu działania na rzecz strategii zaawansowanej technologii 2020” w 2011 roku. W Niemczech rozpoczęła się dyskusja na temat przemysłu 4.0, która rozprzestrzeniła się na inne kraje. W Europie przyjął się

termin przemysł 4.0, natomiast Stanach Zjednoczonych przyjęto używać pojęcia inteligentne wytwarzania (*ang. smart manufacturing*), z kolei w Azji przyjął się termin inteligentnej fabryki (*ang. smart factory*).

Istotą terminu przemysł 4.0 jest wskazanie, że współcześnie ma miejsce czwarta rewolucja przemysłowa (Rys. 16). Pierwsze trzy rewolucje przemysłowe powstały w wyniku mechanizacji, elektryczności i zastosowania systemów informatycznych. Obecnie wprowadzenie IoT i CPS do środowiska produkcyjnego napędza czwartą rewolucję przemysłową.



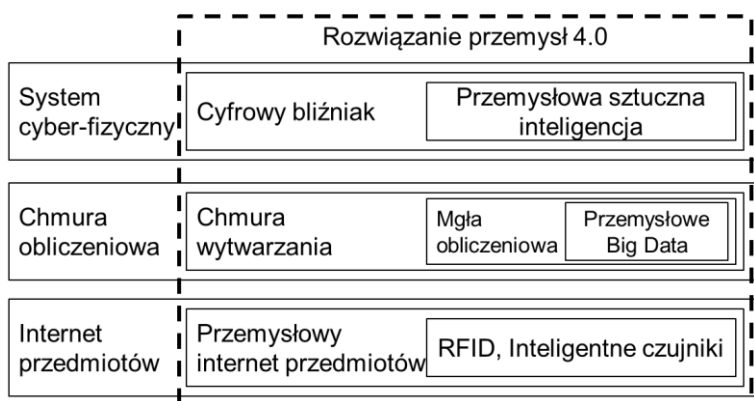
Rys. 16. Cztery etapy rewolucji przemysłowej [87]

Rozwiązania klasy przemysłu 4.0 wykorzystują rozwiązania technologii informatycznych, które wymieniają informacje (na temat urządzeń hali produkcyjnej, wyrobów) uruchamiają działania i niezależnie kontrolują się nawzajem. Fabryki klasy przemysłu 4.0 mają stanowić inteligentne środowiska, w których świat rzeczywisty jest dokładnie odwzorowany w świecie cyfrowym. Silne powiązanie elektrotechnicznego i hierarchicznego świata automatyzacji w ramach inteligentnej fabryki umożliwia dynamiczną inżynierię odwrótną (*ang. reengineering*) procesów i zapewnia możliwość elastycznego reagowania na zakłócenia i awarie [112].

Rozwój systemów przemysłu 4.0 opiera się głównie na rozwiązaniach technologii informatycznych dedykowanych dla przemysłu. Technologie informatyczne dedykowane dla przemysłu stanowią implementację natywnych technologii informatycznych odpowiednich do wymagań domeny działań

przemysłowych – co zostało przybliżone w poprzednich rozdziałach. Technologie te zapewniają interdyscyplinarne połączenie inżynierii produkcji, systemów informatycznych, mechatroniki, technologii komunikacyjnych i analityki danych.

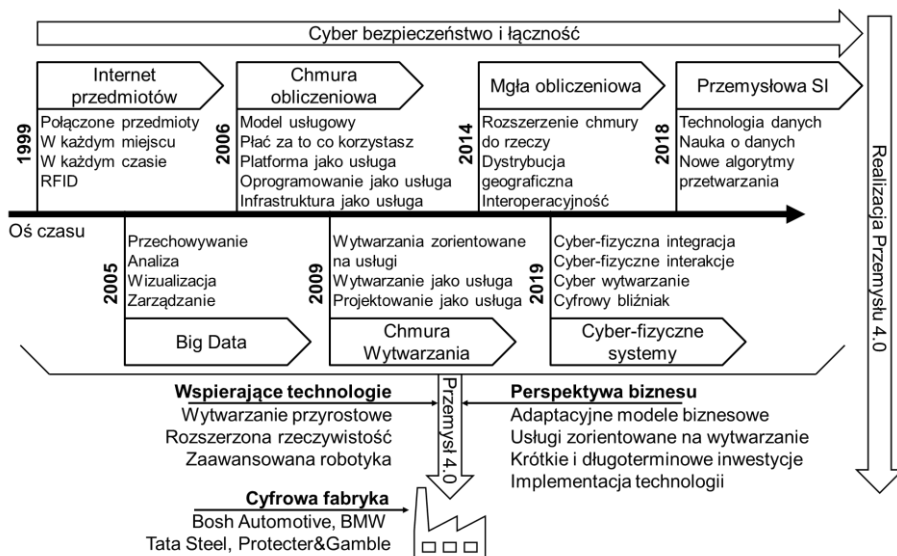
Rozwiązanie przemysłu 4.0 stanowi zbiór funkcjonalności opisywanych technologii informatycznych, wybranych i połączonych właściwie do zgłaszanej potrzeby biznesowej przedsiębiorstwa produkcyjnego, co ilustruje rysunek 17.



Rys. 17. Rozwiązanie przemysł 4.0

Źródło: Opracowanie własne

Przemysł 4.0 stanowi wynik ewolucji tych technologii informatycznych w obszarze produkcji (Rys. 18).



Rys. 18. Ewolucja przełomowych technologii w produkcji [63]

Zastosowanie przemysłu 4.0 i jego rozwiązań ma zapewniać budowę inteligencji, która będzie mogła wspierać procesy wytwarzania w ramach cyfrowej fabryki. Zastosowania przemysłu 4.0 są szeroko opisywane w literaturze [7], [18], [74], [110], [111]. W zasadzie nowe rozwiązania powstają na całym świecie. Dominują rozwiązania niemieckie i chińskie.

Czwarta rewolucja przemysłowa ma doprowadzić do powstania fabryk nowej generacji. Fabryk wykorzystujących technologie informatyczne dla kompleksowego wielowymiarowego wsparcia procesów przemysłowych. Osiągnięciami w tym zakresie mogą już pochwalić się firmy takie jak Bosh Automotive, BMW, Procter & Gamble czy Tata Steel.

### **2.3.7.1. Przemysł 4.0 w statystykach i badaniach**

Statystyki pokazują, że koncepcja przemysłu 4.0 stanowi już ugruntowaną ramę dla realnych rozwiązań, które znajdują popyt na rynku. Agencje badawcze analizujące rynek zauważają gwałtowny rozwój zastosowań technologii internetu przedmiotów. Jak prognozuje agencja badawcza Gartner Inc. w 2020 roku na całym świecie będzie użytkowanych 20 mld podłączonych przedmiotów [124].

Przewiduje się, że do 2020 roku przemysł wytwórczy, transportowy i logistyczny oraz sektor użyteczności publicznej wyda po 40 mld USD na platformy, systemy i usługi IoT. Agencja badawcza McKinsey przewiduje, że do 2020 roku rynek IoT będzie wart 581 mld USD, przy czym skumulowany roczny wskaźnik wzrostu wyniesie od 7 do 15%. Jak wynika z badania agencji badawczej Forrester'a, przemysł wytwórczy przoduje w adaptacji IoT we wszystkich gałęziach przemysłu na poziomie 45%, z dodatkowym 22% planami przyjęcia IoT w ciągu najbliższych 12 miesięcy. Przewiduje się, że rynek przemysłowego Internetu przedmiotów osiągnie poziom 123 mld USD w 2021 roku, osiągając skumulowany roczny wskaźnik wzrostu na poziomie 7,3% do 2020 roku jak podaje agencja badawcza Capgemini [125]. Natomiast przedsiębiorstwo Harley Davidson zredukowało cykl produkcji na zamówienie 36-krotnie i zwiększyło ogólną rentowność od 3% do 4%, przenosząc produkcję do zakładu z pełną obsługą technologii informacyjno-komunikacyjnych zapewnioną przez IIoT.

W Polsce, jak wynika z badania „PSI Polska: Polska produkcja gotowa na przemysł 4.0?” [126] z terminem przemysł 4.0 spotkała się ponad połowa przedsiębiorstw (52%). Większą wiedzą na temat tej koncepcji wykazali się duzi producenci (62%) w stosunku do średnich (41%). Aż 70% firm znających koncepcję przemysłu 4.0 planowało bądź już zaczęło wdrażać rozwiązania będące jej elementem. Liderem okazały się duże firmy, bo takie działania podjęło ponad 3/4 z nich (77%). Wśród średnich przedsiębiorstw wskaźnik ten wyniósł 59%. Obie badane grupy równie chętnie deklarowały wdrażanie tych technologii w przyszłości. Najbardziej entuzjastycznie do tego procesu podchodzili producenci maszyn i urządzeń (87%) oraz samochodów i sprzętu transportowego (70%).

Natomiast badanie „Siemens / MPiT / KANTAR: Smart Industry Polska 2019” [127] pokazuje, że w polskich przedsiębiorstwach w kontekście przemysłu 4.0 większość inżynierów jest zdania, że kadra techniczna powinna przyjąć na siebie odpowiedzialność związaną z rolą lidera zmian w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Spośród różnych kompetencji inżyniera, pracownicy za najistotniejsze uznali umiejętności techniczne, wymagające znajomości i zrozumienia przebiegu procesu produkcji (93% wskazań). Niewiele niżej wskazywano zdolności personalne (89%), na które składają się: myślenie analityczne, rozwiązywanie problemów, jak również osobiste przymioty, takie jak gotowość do ciągłego uczenia się. Ponad 80% respondentów uznała za zdecydowanie ważne lub raczej istotne umiejętności społeczne, związane z komunikacją i współpracą z innymi osobami, rozumieniem ich potrzeb, przywództwem oraz nawiązywaniem i utrzymywaniem kontaktów biznesowych. Co więcej, z badania „IDG/ABB: przemysł 4.0 w Polsce: brakuje strategii i liderów” wynika, że zaledwie 14% przedsiębiorstw ma opracowany strategiczny plan transformacji dla działań w ramach Gospodarki 4.0 i zaczęło wdrażać go w życie. Niemal połowa (48%) deklaruje, że działania związane z cyfryzacją procesów wytwórczych nie mają umocowania na poziomie strategii przedsiębiorstwa, choć prowadzone są mniejsze projekty w tym obszarze. Raport zwraca też uwagę na to, że więcej niż co czwarta firma (27%) nie zamierza prowadzić żadnych działań związanych z szeroko pojętą Gospodarką 4.0 [128].

### 2.3.7.2. Przemysł 4.0 a systemy czasu rzeczywistego

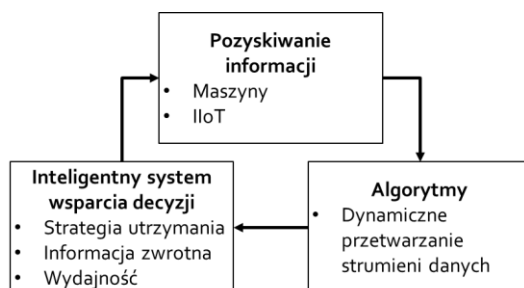
Budowa rozwiązań klasy przemysłu 4.0 jest ściśle związana z zagadaniem systemów czasu rzeczywistego. Zgodnie z definicją Instytutu Inżynierów Elektryków i Elektroników, IEEE (*ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers*) system czasu rzeczywistego (*ang. real-time*) to system, którego poprawność działania zależy nie tylko od poprawności logicznych rezultatów, lecz również od czasu, w jakim te rezultaty są osiąganе (czasu reakcji) [46]. Tryb przetwarzania w czasie rzeczywistym polega na tym, że programy przetwarzające napływające dane są zawsze dostępne, a wynik ich działania jest dostępny nie później niż po zadanym czasie. Czas ten można różnorodnie definiować. Przy czym można przyjąć następującą klasyfikację [123]:

- przetwarzane wsadowe macro:  $\geq 15$  minut,
- przetwarzane wsadowe micro:  $\geq 2$  minuty i  $< 15$  minut,
- obsługa decyzji w czasie zbliżonym do rzeczywistego:  $\geq 2$  sekundy i  $< 2$  minut,
- przetwarzanie zdarzeń prawie w czasie rzeczywistym:  $\geq 50$  milisekund i  $< 2$  sekund,
- czas rzeczywisty  $< 50$  milisekund.

Moment nadejścia kolejnych danych może być losowy (asynchroniczny) lub ściśle określony (synchroniczny). System czasu rzeczywistego jest systemem interaktywnym, który utrzymuje ciągły związek z asynchronicznym środowiskiem, na przykład ze środowiskiem, które zmienia się w sposób niezależny. Oprogramowanie czasu rzeczywistego odnosi się do systemu lub trybu działania, w którym przetwarzanie jest przeprowadzane na bieżąco, w czasie wystąpienia zewnętrznego zdarzenia, w celu użycia rezultatów przetwarzania do kontrolowania lub monitorowania zewnętrznego procesu. System czasu rzeczywistego odpowiada w sposób przewidywalny (w określonym czasie) na bodźce zewnętrzne napływające w sposób nieprzewidywalny [55]. Systemy czasu rzeczywistego są badane i rozwijane od wielu lat w dziedzinie sterowania, awioniki czy badań operacyjnych. Pojawienie się nowej klasy systemów związanych z koncepcją przemysł 4.0 uutorowało drogę do badań i rozwoju systemów czasu rzeczywistego nowej generacji. Wynika to ze wzrostu objętości, prędkości i różnorodności danych strumieniowych [46]. W perspektywie bardzo wysokiej złożoności systemów wytwarzania, jak również postępującej zmiany architektury i modeli produkcyjnych oraz rosnącej liczby narzędzi, które umożliwią natychmiastowe przetwarzanie danych – wzrośnie liczba rozwiązań wymagających większej kontroli i nadzorowania. Zatem oczekuje się, że wzrośnie również liczba systemów czasu rzeczywistego.

Dzięki technologii IIoT, która umożliwia pozyskiwanie danych z poziomu hali produkcyjnej w czasie rzeczywistym. Możliwym staje się sterowanie produkcją za pomocą systemów adaptacyjnego uczenia się, zapewniając kontrolę nad różnymi procesami – bez nadzoru operatora. Systemy czasu rzeczywistego klasy przemysł 4.0 (Rys. 19) uwzględniają zarówno zmieniające się warunki, jak i możliwości technologii informatycznych i składają się z następujących elementów [62]:

- pozyskiwanie informacji – system umożliwia maszynom pozyskiwanie informacji od swoich odpowiedników, operatorów i innych otaczających je środowisk, tak aby maszyny mogły osiągnąć samoświadomość stanu poprzez porównywanie i uczenie się na podstawie danych historycznych jego odpowiedników,
- algorytmy – dynamiczna analizę strumieni danych z poziomu hali,
- inteligentny system wspomagania decyzji – w zakresie strategii utrzymania, maksymalizacja wydajność systemu wytwarzania poprzez zrównoważenie i skompensowanie obciążeń narzędzi związanych z pracą danej maszyny zgodnie z jej indywidualnym stanem.



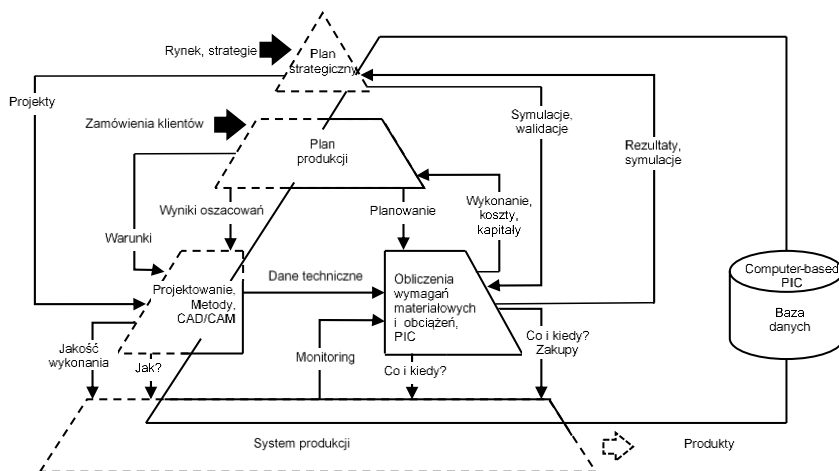
Rys. 19. Schemat działania systemu czasu rzeczywistego klasy Przemysł 4.0 [62]

Tworzenie interdyscyplinarnych rozwiązań klasy przemysłu 4.0 wymaga zaangażowania kompetentnej kadry inżynierskiej. Innowacyjność i kreatywność pracowników stanowi ogromny zasób dla dalszego rozwoju systemu wytwarzania. Pracownicy dysponujący odpowiednim potencjałem wiedzy eksperckiej to podstawa dla rozwiązywania złożonych problemów.

### 2.3.7.3. Przemysł 4.0 a CIM

Zadaniem systemów informatycznych w systemach wytwarzania jest wsparcie realizacji procesów wytwarzania. Zastosowanie oprogramowania pomaga w tworzeniu modeli geometrycznych wyrobów, testowaniu ich cech w procesach symulacyjnych, opracowywaniu procesów technologicznych wraz z doбором ich parametrów czy opracowaniu strategii procesów kontroli jakości i innych. Zadania te realizowane są przez specjalizowane oprogramowanie inżynierskie. Oprogramowanie to działa w ramach osobnych baz danych. Z tego powodu w celu zapewnienia wspólnego zbioru danych i ich wymiany stosuje się rozwiązania komputerowo zintegrowanego wytwarzania (*ang. computer integrated manufacturing, CIM*).

Zadaniem CIM jest koordynowanie przepływu materiałów i informacji w procesie wytwarzania. Tak, by każda realizowana operacja logistyczna, w trakcie produkcji, mogła dostarczyć właściwy materiał we właściwe miejsce, w którym operator będzie wyposażony we właściwą informację pozwalającą wykonać harmonogram pracy w określonym czasie. W ten sposób system CIM ma za zadanie zapewniać płynność procesu produkcji. Równowaga w procesie produkcji zostanie osiągnięta gdy wartość każdego z zasobów odpowiada zgłoszonej potrzebie związanej z wytwarzanym produktem [100]. Piramidę aplikacyjności poziomów CIM w przemyśle przedstawia rysunek 20.



Uzyskaniu równowagi służy oprogramowanie, które realizuje dane zadanie w danej kategorii wsparcia systemu produkcyjnego, jako komputerowo wspomagane:

- projektowanie (*ang. computer aided design, CAD*),
- prac inżynierskich (*ang. computer aided engineering, CAE*),
- wytwarzanie (*ang. computer aided manufacturing, CAM*),
- planowanie procesów (*ang. computer aided planning, CAP*),
- sterowanie jakością (*ang. computer aided quality, CAQ*).

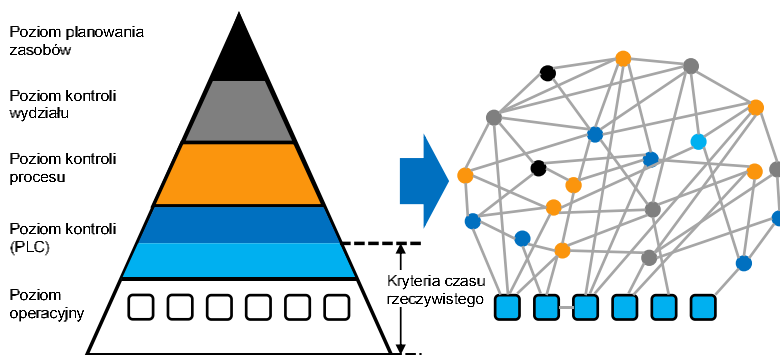
Rozwiązanie komputerowej integracji wytwarzania opiera się na współdziałaniu wielu systemów i pozwala na znaczne uproszczenie procesów, działań i kontroli nad nimi. Informacje wykorzystywane zawarte są w jednej wspólnej bazie danych lub w kilku zintegrowanych ze sobą. Daje to możliwość eliminacji duplikacji danych i usprawnia ich przeszukiwanie. Rozwiązania CIM są dostosowywane do wymagań i charakteru działalności danego przedsiębiorstwa. CIM nie jest gotowym produktem lecz stanowi długoterminową strategię działania i dąży do integracji procesów, automatyzacji, skracania czasów, podniesienia wskaźnika elastyczności, wzrostu efektywności oraz uproszczenia procesów [104].

Koncepcja CIM powstała w latach osiemdziesiątych. W tym czasie spadła cena komputerów oraz stały się one bardziej dostępne, a przez to dostrzeżono dla nich możliwości, większej liczby zastosowań produkcyjnych. Wskazuje się, że etap intensywnych prac koncepcyjnych w ramach CIM można uznać za kluczowy element trzeciej rewolucji przemysłowej.

Współcześnie nadeszła nowa era systemów wytwarzania związana z globalną inicjatywą przemysłu 4.0. Rozwiązania CIM zapewniają przedsiębiorstwom

metodologię pionowej integracji systemów informatycznych. Takie rozwiązanie zapewnia sprzężenie zwrotne z poziomu wykonawczego na poziom zarządczy. Mocną stroną tego podejścia i hierarchicznej architektury jest dostęp systemów do ogólnej informacji, co jest podstawowym wymogiem optymalizacji systemu wytwarzania. Wszystkie ważne informacje mogą być pobierane z jednego źródła. Słabą stroną tego podejścia jest to, że w sytuacjach dynamicznych, takich jak awaria maszyny, mogą wystąpić duże odchylenia od wcześniej określonego planu. W przeciwieństwie do podejścia scentralizowanego, w ujęciu zdecentralizowanym jeśli po ustaleniu globalnych harmonogramów przez główną jednostkę sterującą nastąpią zmiany, elementy wykonawcze na hali produkcyjnej mogą odrzucić proponowany harmonogram i podjąć najlepszą decyzję w danej sytuacji oraz w oparciu o dostępne informacje [72].

Podstawą dla rozwiązań zdecentralizowanych są rozwiązania przemysłu 4.0. Ta klasa rozwiązań może wspierać zarówno integrację pionową jak i integrację poziomą systemów IT – która integruje cały łańcuch dostaw, lub nawet wszystkie gałęzie danego przemysłu. Ta możliwość daje szeroką perspektywę rozwiązań dla systemów produkcyjnych (Rys. 21).



Rys. 21. Przemysł 4.0 a CIM [76]

W tym układzie rozwiązania przemysłu 4.0 składają się z autonomicznych komponentów i podsystemów, które współpracują w sposób zależny od sytuacji na wszystkich etapach produkcji. Rozpoczynając od procesów przeprowadzanych za pomocą urządzeń produkcyjnych i kończąc na logistyce. Rozwiązania te mogą być sposobem na poprawę wewnętrznej organizacji, a przez to uzyskania przewagi konkurencyjnej. Rozwiązania przemysłu 4.0 stanowią kolejny krok w ewolucji systemów wsparcia systemów wytwarzania takich jak komputerowo zintegrowane wytwarzanie. Zastosowanie jednej klasy systemów wsparcia nie wyklucza innych. Te dwa podejścia są łączone. Producenci systemów informatycznych starają się budować ofertę produktów wspierającą kompleksowo systemy wytwarzania wykorzystując rozwiązania z zakresu CIM i przemysłu 4.0,

co jest już widoczne w obszarze systemów dziedzinowych zarządzania zasobami przedsiębiorstwa (*ang. enterprise resource planning, ERP*).

#### **2.3.7.4. Przemysł 4.0 a metodyka wdrożenia**

Zastosowanie zaawansowanych technologii informatycznych w obszarze produkcji ma za zadanie wytworzenia środowiska aplikacyjnego pozwalającego na uruchomienie algorytmów wspierających system wytwarzania. Wytworzenie takiego środowiska i wykorzystanie technologii nie jest zadaniem trywialnym. Potrzebna jest koordynacja działań jak i interdyscyplinarna wiedza łącząca zagadnienia systemu wytwarzania, informatyki oraz zarządzania. Dlatego wdrożenia rozwiązań przemysłu 4.0 realizowane jest jako projekt.

Projekt w ramach organizacji to przedsięwzięcie nowe, nietypowe, odmienne od działań rutynowych, z którymi dana organizacja nie miała do czynienia [83]. Bezpośrednio z zagadnieniem projektu wiąże się dziedzina wiedzy jaką jest zarządzanie projektami (*ang. project management*). Jest to dziedzina zarządzania zajmująca się zastosowaniem dostępnej wiedzy, umiejętności, metod i narzędzi w celu osiągnięcia założonych celów projektu – to znaczy jakości zamierzonego rezultatu, terminu i kosztów. Zarządzanie projektami opiera się na podejściu procesowym i wymaga harmonogramowania procesów wykonawczych i dodatkowych projektów, za pomocą procesów zarządczych związanych z wyznaczaniem celów, planowaniem, organizowaniem i sterowaniem. Zarządzanie projektami tworzy bazę wiedzy dla umiejętności kierowniczych potrzebnych do realizacji tych przedsięwzięć [108]. Realizacja projektu wymaga podjęcia szeregu decyzji zarówno operacyjnych jak i strategicznych. Każda decyzja niesie też ze sobą pewne ryzyko. Dlatego skutki podejmowanych decyzji przez kierownika projektu czy zespołów projektowych są krytyczne dla ostatecznego sukcesu danego projektu.

W prowadzeniu projektów pomaga korzystanie z metodyk, które stanowią zestaw wskazówek, zasad i reguł, które wyznaczają sposób postępowania przy realizacji projektu, w zakresie działań zarządczych, ale też w sensie zewnętrznej organizacyjni całego przedsięwzięcia. Stosowanie metodyki ma zapewnić skuteczność planowania, monitorowania i sterowania przebiegiem prac [35].

Wyróżnia się metodyki zarządcze jak i metodyki techniczne. Zarządcze wskazują sposób realizacji lub organizacji prac, a techniczne koncentrują się na sposobie realizowania prac merytorycznych w danej dziedzinie problemowej. Praktyka zarządzania projektami wskazuje, że sposoby realizacji działań zarządczych są w dużym stopniu podobne w różnych dziedzinach problemowych, natomiast działania techniczne różnią się i bardzo silnie zależą od rodzaju produktu, który ma powstać w ramach projektu. Z tego też względu metodyki zarządzania projektami są stosunkowo generyczne w stosunku do dziedziny projektu, zaś metodyki techniczne powstają jako wysoko specjalistyczny sposób realizacji zadania technicznego [35]. Wskazuje się dwa podejścia zarządzania

projektami, klasyczne i zwinne. Ujęcie te różnią się między sobą w wymiarach, takich jak: odpowiedzialność za produkt, rola menedżera w zespole, istota prac wstępnych, zdefiniowanie produktu czy odpowiedź zwrotna użytkowników, co przedstawia tabela 2.

Podjęcie klasyczne, reprezentowane jest przez standard zarządzania projektami Project Management Body of Knowledge, PMBoK opracowany przez Project Management Institute. Klasyczne podejście reprezentowane jest też przez metodykę PRINCE oraz jej następcę PRINCE2. Obie te metodyki mają na celu wytworzenie całego produktu przy wcześniejszym dokładnym określeniu jego cech. Charakterystyczną własnością tego ujęcia jest formalizm, co objawia się dużą liczbą generowanych dokumentów.

Tabela 2. Klasyczne a zwinne podejście

| Wymiar                      | Podejście klasyczne                                                                  | Podejście zwinne                                                                       |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Odpowiedzialność za produkt | Podzielona między marketera, menedżera produktu i menedżera projektu                 | Istnieje tylko jeden właściciel produktu                                               |
| Rola menedżera w zespole    | Oddzielony od zespołów deweloperskich                                                | Jest członkiem zespołu i ściśle z nim współpracuje                                     |
| Istota prac wstępnych       | Przeprowadzane są szczegółowe badania rynku, planowanie produktu i analizy biznesowe | Ograniczają się do stworzenia wizji, która ogólnie opisuje wygląd i działanie produktu |
| Zdefiniowanie produktu      | Wymagania są określane i zatwierdzane w początkowej fazie                            | Produkt odkrywany jest stopniowo, a wymagania krystalizują się w trakcie               |
| Odpowiedź zwrotna           | Dostępna po wypuszczeniu produktu na rynek                                           | Wczesna i częsta odpowiedź zwrotna po małych wdrożeniach                               |

Źródło: [51]

Natomiast podejście zwinne zorientowane jest na zespół, który w pełni odpowiada za wykonanie swojej części zadania i stopniowo dostosowuje go do potrzeb przyszłych użytkowników. W praktyce gospodarczej często zespoły projektowe nie wykorzystują jednej metodyki, a opierają się na kilku [51].

W perspektywie przemysłu 4.0 literatura [12], [98] koncentruje się na opisanu architektury rozwiązań klasy 4.0. Opiswane są korzyści, które te rozwiązania przynoszą oraz to jak są wykorzystywane. Przedstawiane są przypadki użycia i wdrożenia przemysłu 4.0.

To co charakterystyczne to brak bądź trudno jest odnaleźć przykłady opisanych sposobów użycia tych technologii, krok po kroku. Brak jest

przykładów opisujących szczegółowo jaką strategię należy obrać by ją z sukcesem wdrożyć. Co jest zrozumiałe, gdyż sposób ten stanowi know-how przedsiębiorstw wdrażających rozwiązania przemysłu 4.0 w obszarze produkcji. Taki sposób stanowi metodykę techniczną, bazującą na merytoryce dotyczącej danej wiedzy dziedzinowej i bezcennego doświadczenia.

Dlatego można mówić o braku zestandaryzowanych metodyk technicznych dedykowanych przemysłowi 4.0. Stąd pojawia się przestrzeń do formułowania metodyki bazujących na podejściu klasycznym jak i zwinnym, które przedstawiałoby spójny sposób postępowania w ramach projektu wdrożenia rozwiązania klasy przemysłu 4.0.

### **2.3.8. Podsumowanie**

Podsumowując, nowe technologie otwierają przestrzeń dla lepszych rozwiązań wspierających realizację zadań systemów wytwarzania. Wdrożenia nowoczesnych technologii informatycznych koncentrują się na budowie cyfrowej pętli sprzężenia zwrotnego. Tak by zapewnić informację o statusie i stanie produkcji w czasie rzeczywistym zapewniając możliwość szybkiej, a najlepiej automatycznej reakcji na zmiany zachodzące na produkcji.

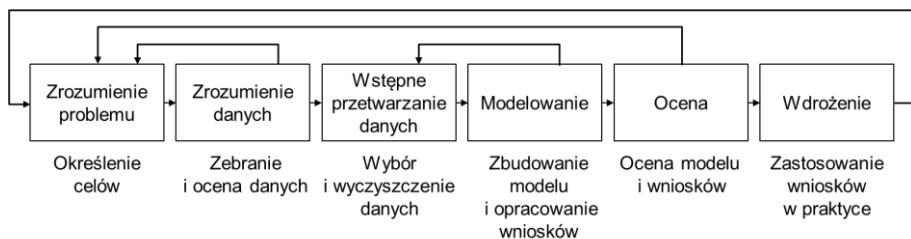
Rozwiązania tej klasy przedstawia się jako realizację czwartej rewolucji przemysłowej, określanej też mianem przemysłu 4.0. Zarówno pojęcie jak i technologie czwartej rewolucji przemysłowej są znane przedsiębiorstwom produkcyjnym na świecie jak i w Polsce. Wdrożenie rozwiązań przemysłu 4.0 ma prowadzić do pojawienia się cyfrowych fabryk, w których większość realizowanych zadań posiada wsparcie cyfrowej inteligencji, a funkcja zarządzania realizowana jest zarówno w hierarchii, ale też poziomo, w wymiarze produktów i maszyn systemu wytwarzania. Sporządzanie systemów przemysłu 4.0 opiera się o schemat, w którym dane są pozyskiwane, przetwarzane z wykorzystaniem algorytmów, a wynik działania algorytmów jest podstawą do podjęcia działań korygujących, naprawczych czy rozwojowych.

Przy czym rozwiązania klasy przemysłu 4.0 wymagają interdyscyplinarnej wiedzy z różnych zakresów, zarówno IT jak i zarządzania produkcją. Wiedza jest niezbędna by wykorzystać szansę na poprawę efektywności dotychczasowych systemów wytwarzania, a także rozwinięcie nowych, w ramach inteligentnych fabryk. Ponadto potrzebne też są udokumentowane sposoby jak tego typu rozwiązania tworzyć i wdrażać.

## 2.4. Analiza danych z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych

Nowoczesne rozwiązania wspierające realizację zaawansowanych strategii utrzymania powstają jako wynik analizy danych systemów wytwarzania. Rozwiązania tworzone są w ramach systematycznego procesu eksploracji danych z narzędzi nauki o danych (*ang. data science, DS*). Nauka ta jest interdyscyplinarną dziedziną związaną z procesem naukowego i systematycznego wyodrębniania wiedzy (zależności, relacji) z różnej postaci danych występującej w formie ustrukturyzowanej jak i nieustrukturyzowanej [105].

Eksploracja danych przeprowadzana jest w zestandaryzowany sposób zgodnie z metodyką CRISP-DM (*ang. cross industry standard process for data mining*). Kroki metodyki zilustrowane zostały na rysunku 22. Metodykę tą charakteryzuje iteracyjny charakter procesu wydobywania wiedzy z danych.



Rys. 22. Metodyka CRISP-DM [105]

Zrozumienie problemu w ramach metodyki rozumiane jest jako sformułowanie celów i wymagań projektu w terminologii dziedziny – elementy te potrzebne są do opracowania definicji problemu eksploracji danych i wstępnego planu działania. Następnie należy zebrać i ocenić dane – wyodrębnić interesujące podzbiory. Kolejny krok to jeden z najbardziej żmudnych etapów, gdy dokonywane są zadania związane z czyszczeniem danych i wykonywaniem wszelkich koniecznych przekształceń. Modelowanie to etap wyboru i parametryzacji modelu – na tym etapie tworzy się wiele modeli. Następnie ma miejsce ich weryfikacja pod kątem jakości i efektywności. Co więcej, po stwierdzeniu spełnienia postawionych wymagań, podejmowana jest decyzja o wdrożeniu. Przy czym wdrożenie wiąże się z wykorzystaniem opracowanego modelu i jego implementacji w ramach aplikacji [106]. Proces wydobywania wiedzy w kontekście rozwiązania danego problemu, stanowi unikalny zestaw założeń, metod i interpretacji. Podobnie sposób uzyskania aplikacyjnego rozwiązania stanowi za każdym razem nowe podejście prowadzenia analizy danych [101].

### 2.4.1. Metody pozyskiwania danych produkcji

Pozyskiwanie danych produkcyjnych jest kluczowym zadaniem realizowanym w ramach systemów wsparcia procesu wytwarzania. Ważne jest, by agregowane dane wyrażały prawdziwy obraz tego procesu. Dlatego dane należy pozyskiwać w sposób skuteczny i wierny by były wiarygodną podstawą analiz w wymiarze dostępności, jakości i wydajności.

Pozyskiwanie danych z procesu produkcyjnego może odbywać się ręcznie albo automatycznie z wykorzystaniem rozwiązań systemów wbudowanych maszyn. Wybrana metoda pozyskiwania zależy od wielkości i złożoności zarządzanego systemu wytwarzania. Sygnały rejestrowane przez czujniki pomiarowe są bezużyteczne do celów aplikacji wyższego poziomu – chyba że zostaną przetworzone. Dopiero zastosowanie algorytmu przetwarzania łączy pozyskane dane i zdarzenia produkcyjne. Dobór algorytmu wymaga jednoczesnego zrozumienia monitorowanego procesu i charakterystyki przetwarzanego sygnału [13]. Czujniki pozwalają na pozyskiwanie różnych sygnałów (moc, moment obrotowy, temperatura, wibracje czy emisja akustyczna), które korelują ze stanem i statusem procesów wytwarzania. To, który z tych sygnałów jest krytyczny dla realizowanego procesu systemu wytwarzania, a dokładniej dla danego procesu technologicznego realizowanego przez daną maszynę, wynika z technologii bądź przyjętej strategii utrzymania. Można wyróżnić co najmniej trzy metody pozyskiwania danych z poziomu hali produkcyjnej: pomiary zapisywane przez operatora, wewnętrzny system monitorowania maszyny, zewnętrzny system pozyskiwania danych.

- Dane pozyskiwane ręcznie

W przypadku pozyskiwania danych przez operatora, wiąże się to ze sporządzeniem dokumentacji papierowej bądź sporządzeniem plików z wykorzystaniem arkuszy kalkulacyjnych. Metodę tą charakteryzuje opóźnienie w stosunku do rzeczywistych warunków procesu. W typowym scenariuszu ręcznie zebrane dane produkcyjne są wprowadzane/zapisywane do pliku tylko w określonych z góry czasach, takich jak koniec zmiany lub zadania. Dane są następnie udostępniane w formie raportów i wykorzystywane do analizy. W przypadku analizy długoterminowej zwykle wystarczy przeglądanie danych „po fakcie”. Jednak hala produkcyjna jest dynamicznym środowiskiem, a wiedza o tym, co wydarzyło się po fakcie, może mieć negatywny wpływ na wydajność systemu. Innym problemem związanym z ręcznie wprowadzanymi danymi jest to, że są one niekompletne. Osoba odpowiedzialna za zapis danych, jest też obciążona wieloma innymi obowiązkami. Zadanie wprowadzania danych jest żmudnym, nudnym zadaniem, które zwykle jest odkładane tak długo, jak to możliwe. Zatem raporty produkcji, w perspektywie najnowszych danych, są

niekompletne. Dodatkowo ręcznie pozyskiwane dane są niedokładne. Istnieje wiele możliwości, by doszło do pomyłki podczas ręcznej akwizycji danych. Dane muszą być najpierw spisane, a następnie wprowadzone do pliku lub formularza. Zatem w przypadku tej metody błąd ludzki jest nieunikniony, a gdy błędy te staną się częścią zestawu danych, stają się trudne do wykrycia i wyeliminowania.

Sporządzanie dokumentacji w formie edytowalnego pliku bądź w formie papierowej pozostawia możliwość sabotażu. Wskutek istnienia zafałszowanych zapisów działania korygujące mogą zostać podjęte za późno bądź też nie podjęte zupełnie. Pozyskiwane ręcznie dane dają pewien rodzaj informacji, ale nie jest on w pełni wiarygodny. Dlatego skuteczność tej metody jest bezpośrednio zależna od pracy i sumienności operatorów.

- Wewnętrzny system monitorowania maszyny

Dane pozyskiwane z wewnętrznego systemu monitorowania maszyny, stanowią zapis danych realizowany przez wewnętrzne czujniki i systemy maszyn. Maszyna rejestruje te dane w ramach kontroli realizowanego procesu technologicznego, ale też ze względu na kwestie gwarancyjne. Odpowiednie odczyty zapisywane są do pamięci wewnętrznej maszyny.

Źródło danych wewnętrznych systemów monitorowania można podzielić na dwie kategorie: pierwotną i wtórną. Pierwotnymi źródłami są czujniki i urządzenia pomiarowe – bezpośrednio reagujące na zmiany w procesie technologicznym. Wtórne to urządzenia takie jak sterowniki przemysłowe (PLC), systemy sterowania CNC i roboty przemysłowe. Wtórne przekazują sygnał ze źródeł pierwotnych jednocześnie generują nowe dane wynikające z działania algorytmów sterujących przetwarzających oryginalne dane ze źródeł pierwotnych. Systemy SCADA są również źródłami wtórnymi, integrującymi dane z różnych rodzajów źródeł. Jednocześnie systemy SCADA mogą również gromadzić dane od operatorów procesów lub nadzorców (polecenia i dane wprowadzane ręcznie) lub generować je, dzięki zaimplementowanym głównym algorytmom sterowania [19].

Pozyskiwanie danych z wykorzystaniem systemów wewnętrznych rozwiązuje wady ręcznego pozyskiwania danych. Z drugiej strony wiąże się z nim szereg problemów, do których można zaliczyć:

- transfer danych przy pomocy pamięci przenośnej USB,
- wymagane okresowe zgrywanie danych,
- konieczność zatrzymania pracy maszyny,
- trudność w akwizycji danych z wielu maszyn,
- nadmiarowy ruch związany z koniecznością zgrania danych,
- konieczność posiadania wewnętrznej sieci,
- transfer danych przy pomocy sieci intranetowej przedsiębiorstwa,
- zakup dodatkowego złącza maszyny do transferu danych,

- podgląd parametrów możliwy jedynie na interfejsie graficznym maszyny (*ang. human machine interface, HMI*),
- standaryzacja formatu danych,
- filtrowanie danych w celu wyszczególnienia tylko tych istotnych,
- konieczne dysponowanie dużą mocą obliczeniową w celu przetworzenia strumienia danych,
- ograniczenia licencyjne i uzależnienie od dostawcy (*ang. vendor lock-in*),
- ograniczenia gwarancyjne.

Odpowiedzią na szereg wymienionych problemów jest standaryzacja w sieci komunikacyjnej i sposobów wymiany danych pomiędzy maszynami. W zakresie sieci jest to wprowadzenie standardu łączności Ethernet – zamiast połączeń szeregowych. Nowe kontrolery mają wbudowaną funkcję Ethernet. Starsze sterowniki mogą zwykle być wyposażone w karty Ethernet lub konwertery szeregowo na Ethernet. Natomiast w zakresie standardów wymiany danych jest to wprowadzenie standardów takich jak OPC Unified Architecture czy MTConnect. OPC Unified Architecture (OPC UA) to protokół komunikacyjny opracowany przez OPC Foundation w celu ujednolicenia komunikacji między maszynami bazujący na ogólnie przyjętych komunikacyjnych protokołach takich jak TCP/IP, HTTP, SOAP, co zapewnia bardzo dużą skalowalność rozwiązań. OPC UA umożliwia przesyłanie danych za pośrednictwem różnych formatów między innymi formatu opartego na XML i formatu binarnego. Serwer OPC zbudowany w oparciu o Unified Architecture dedykuje swoim klientom OPC zestaw usług jakie oferuje oraz format danych procesowych za pośrednictwem którego ma odbywać się komunikacja [69], [14].

MTConnect to protokół przeznaczony do wymiany danych między urządzeniami hali produkcyjnej, a aplikacjami służącymi do monitorowania i analizy danych. Określany jest jako standard tylko do odczytu, co oznacza, że definiuje tylko pobieranie (odczyt) danych z urządzeń sterujących, a nie zapisywanie danych do urządzenia sterującego. Idea protokołu jako standardu nawiązuje do innych inicjatyw przyjętych przez światowy przemysł komputerowy w celu umożliwienia podłączenia urządzeń peryferyjnych. Specyfikacja MTConnect zapewnia otwarty i rozszerzalny kanał komunikacji dla połączeń między urządzeniami i systemami. Wspólna komunikacja jest realizowana dzięki zastosowaniu standardów XML i HTTP. Centralnym składnikiem MTConnect jest agent MTConnect. Ten komponent łączy się z urządzeniami i gromadzi dane maszyn. Następnie przekazuje dane klientowi jako znormalizowany plik XML przez protokół HTTP. Kolejnym istotnym elementem jest adapter MTConnect. Adaptery MTConnect pozwalają urządzeniom zawierającym różne typy kontrolerów komunikować się z MTConnectAgent [26].

- Zewnętrzny system pozyskiwania danych

Rozwiązanie zewnętrznego systemu pozyskiwania danych realizowane jest za pomocą dodania dedykowanego urządzenia agregacji danych wraz z zestawem czujników dla danej maszyny. Dodanie dedykowanego urządzenia do gromadzenia danych jest rozwiązaniem przydatnym, gdy pojawia się potrzeba pozyskiwania danych z różnych maszyn. Urządzenie to komputer wbudowany bądź komputer o małej mocy obliczeniowej. Komputery te mają moduły Ethernet, są łatwe w instalacji (często wymagają tylko dwóch lub trzech prostych połączeń z każdą maszyną) i posiadają interfejs użytkownika, który wymaga uwagi operatora dopiero na początku każdego zadania lub gdy maszyna nie działa przez dłuższy czas.

W związku ze wzrostem liczby rozwiązań przemysłu 4.0, realizacja zewnętrznego systemu monitorowania może być realizowana przez urządzenia przemysłowego internetu rzeczy. Urządzenia te mają zdolność logowania (zapisu) i przekazywania wielu różnych wielkości towarzyszących pracy maszyn. W oparciu o pozyskane dane można tworzyć model pracy urządzenia, który ma prowadzić do bieżącej diagnostyki samej maszyny, a przede wszystkim realizowanego procesu. Urządzenie IIoT dostarcza dane w czasie bieżącym i jest efektywne kosztowo – to znaczy, że charakteryzuje go niska cena. Jest to argument przemawiający za tworzeniem optymalnych kosztowo rozwiązań IoT do zastosowań diagnostycznych. Rynek rozwiązań IoT oferuje też drogie rozwiązania, ale wtedy nie można już mówić o dużym zakresie prowadzonych obserwacji ze względu na koszty. Przewiduje się, że koszt zakupu nawet zaawansowanych narzędzi IoT będzie zmniejszał się wraz z upływem czasu. Dlatego konieczne jest poszukiwanie i odkrywanie sposobów wykorzystania danych dostarczanych przez tą kategorię urządzeń.

Ponadto stale wzrasta ilość usług pozwalających zarządzać siecią urządzeń IoT. Do dostawców tych usług należą Temboo<sup>3</sup>, Tableau<sup>4</sup>, TempoIQ<sup>5</sup> czy Xively<sup>6</sup>. Usługi te zapewniają składowanie pozyskanych danych w ramach usług chmur obliczeniowych Google, Microsoft czy Amazon. Scenariusz wykorzystania tych usług polega na tym, że czujniki pozyskują dane na temat zmieniających się warunków pracy maszyn. Następnie urządzenia IoT agregują te dane – wykonują wstępne przetwarzanie, a w kolejnym kroku wysyłają je na poziom chmury obliczeniowej, gdzie realizowane jest ich przetwarzanie i wizualizacja (Rys. 23).

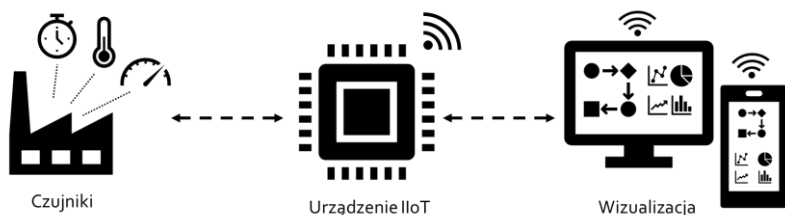
---

<sup>3</sup> <https://temboo.com/>

<sup>4</sup> <https://www.tableau.com>

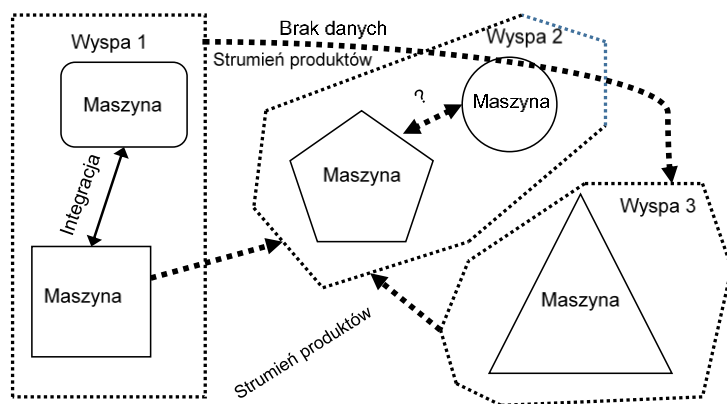
<sup>5</sup> <https://www.tempoi.com/>

<sup>6</sup> <https://xively.com/>



Rys. 23. Scenariusz pozyskiwania danych  
Źródło: Opracowanie własne

Realizacja monitorowania z wykorzystaniem zewnętrznych urządzeń IIoT może znaleźć szczególne zastosowanie w małych-średnich przedsiębiorstwach (MŚP). W tego typu przedsiębiorstwach produkcja realizowana jest w postaci małych serii, na zróżnicowanym parku maszynowym. Oznacza to, że część procesu produkcyjnego realizowana jest na tradycyjnych maszynach, a część na nowoczesnych maszynach sterowanych numerycznie. Brak jest integracji i metod wymiany danych. W rezultacie w ramach parku technologicznego występują obszary zamknięte technologicznie, tak zwane wyspy danych, zilustrowane na rysunku 24.



Rys. 24. Wyspy danych  
Źródło: Opracowanie własne

Ze względu na to, sama organizacja procesu produkcyjnego MŚP w większości pochłania uwagę osób zarządzających jak i realizujących proces produkcyjny. To powoduje, że potrzebny jest bieżący sposób stałego pozyskiwania danych ze zróżnicowanych maszyn. Wobec tego IIoT stanowi odpowiednie i obiecujące rozwiązanie.

W perspektywie metod pozyskiwania danych produkcji, warto jeszcze zaznaczyć, że bez względu na przyjętą metodę pozyskiwania danych zawsze

źródłem danych jest pomiar przeprowadzany za pomocą czujników, narzędzi pomiarowych czy też drogą obserwacji. Dokładność tych narzędzi czy działań będzie definiować dokładność pomiaru. Zatem w zależności od tego jaka wartość będzie mierzona, należy dobrać odpowiednie narzędzie, które zapewni tą dokładność. Inaczej pozyskiwane pomiary będą przedstawiały zniekształcony obraz zachodzących zmian w obrębie hali produkcyjnej.

#### 2.4.2. Sygnał, szereg czasowy i strumień danych produkcji

Wynikiem zastosowania metod pozyskiwania są dane produkcji, które są analizowane z wykorzystaniem właściwych algorytmów. Dane są wynikiem rejestrowanych sygnałów. Sygnał to zmienność dowolnej wielkości fizycznej, która może być opisana za pomocą funkcji jednej zmiennej  $f(x)$  lub wielu zmiennych  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , przykładowo temperatury, ciśnienia czy napięcia elektrycznego. Inżynierów interesują zwykle sygnały będące funkcjami czasu  $f(t)$  lub położenia w przestrzeni  $f(x, y, z)$ . Zatem sygnałem jest zmienność jakiejś wielkości fizycznej w funkcji wybranego argumentu, na przykład temperatury lub natężenia fali elektromagnetycznej w funkcji czasu lub chropowatości powierzchni w funkcji położenia. Sygnały są generowane przez obiekty biologiczne, społeczne, techniczne i zazwyczaj zawierają informację o tych obiektach. Wiele sygnałów generowanych jest także sztucznie przez człowieka i są wykorzystywane w różnych układach technicznych. Ogólnie sygnały można podzielić na [119]:

- funkcje różnych argumentów, na przykład czasu lub położenia (odległości),
- funkcje różnej liczby argumentów (wieloargumentowe), na przykład: jedno, dwu lub wielowymiarowe,
- funkcje przyjmujące różne wartości, na przykład rzeczywiste lub zespolone,
- sygnały ciągłe (analogowe)  $x(t)$ , opisane są ciągłymi funkcjami czasu przyjmującymi wartości ze zbioru liczb rzeczywistych,
- sygnały dyskretne  $x_k(t)$ , są sygnałami ciągłymi w czasie, przyjmującymi wartości dyskretne. Przykładem takiego sygnału jest sygnał wyjściowy z przetwornika cyfrowo-analogowego C/A, którego wartości są skwantowane,
- sygnały ciągłe czasu dyskretnego  $x(n)$  powstają w wyniku dyskretyzacji (próbkowania) w czasie sygnałów ciągłych, to znaczy z sygnału ciągłego pobierane są wartości (próbki) tylko w wybranych chwilach czasowych. Próbkowanie może być równomierne (równe odstępy czasowe pomiędzy chwilami pobierania próbek) lub nierównomierne. W przypadku próbkowania równomiernego odstęp pomiędzy próbkami  $\Delta t$  nazywa się okresem próbkowania, a jego odwrotność  $1/\Delta t$  – częstotliwością próbkowania  $f_p$ .

- sygnały cyfrowe  $x_k(n)$ , czyli sygnały dyskretnie czasu dyskretnego, to sygnały ciągłe czasu dyskretnego  $x(n)$ , w których dodatkowo dokonano kwantowania wartości sygnału, przykładowo zaokrąglono wartości rzeczywiste do najbliższych liczb całkowitych. Sygnały cyfrowe otrzymywane są z przetworników analogowo-cyfrowych (A/C), w których przeprowadza się równocześnie dyskretyzację czasu i kwantowanie wartości sygnałów analogowych (ciągłych). Po przetworniku AC sygnał przyjmuje tylko skończoną liczbę dokładnie określonych wartości (każdy przedział wartości rzeczywistych otrzymuje swojego jednego reprezentanta),
- sygnały deterministyczne to takie, które określają dany „wzór” matematyczny na wartość, jaką przyjmie sygnał w każdej chwili czasu (konkretna zależność matematyczna). W rzeczywistości bardzo rzadko spotyka się sygnały w pełni deterministyczne. Zazwyczaj prawie zawsze wybrane parametry funkcji sygnału, przykładowo amplituda lub faza sygnałów sinusoidalnych, przyjmują wartości, które nie są jednoznacznie określone (zeterminowane),
- sygnały losowe (stochastyczne), tu nie jest znany „wzór” na wartość sygnału w każdej chwili czasowej, tylko „przepis” na prawdopodobieństwo przyjęcia poszczególnych wartości przez ten sygnał. Sygnały losowe dzielą się na sygnały stacjonarne i niestacjonarne.

Z perspektywy przetwarzania, sygnały przedstawiane są w formie zapisu, a ten zapis stanowi szereg czasowy. Szereg czasowy to ciąg obserwacji pokazujący kształtowanie się badanego zjawiska w kolejnych okresach (dniach, miesiącach, kwartałach, latach, itp.). Analiza szeregów czasowych ma dwa główne cele. Pierwszy z nich to wykrycie natury zjawiska reprezentowanego przez sekwencję obserwacji. Drugi to prognozowanie (przewidywanie przyszłych wartości szeregu czasowego). Te cele wymagają zidentyfikowania i opisanie elementów szeregu czasowego. Raz ustalony wzorzec może zostać zastosowany do innych danych to znaczy wykorzystany w teorii badanego zjawiska, na przykład sezonowych cen towarów [129].

W szeregu czasowym można wyodrębnić kilka składowych będących wynikiem wpływu różnych czynników na dane zjawisko [130]. Tradycyjna analiza szeregów dąży do wyodrębnienia struktury szeregu, to jest przeprowadzenia dekompozycji szeregu czasowego. Dekompozycja polega na wyznaczeniu trendu (tendencji rozwojowej) oraz wyodrębnieniu wahań cyklicznych i sezonowych. Struktura szeregów czasowych składa się z:

- trendu, który przedstawia ogólny kierunek rozwoju zjawiska (liniowy lub nieliniowy),

- składowej okresowej, czyli wahania okresowe bądź regularne odchylenia od tendencji rozwojowej. Składowa może wystąpić w postaci wahań cyklicznych bądź sezonowych,
- szumów, tożsamy z zakłóceniami czy też wahaniami przypadkowymi.

Jednym z głównych celów dekompozycji jest oszacowanie efektów sezonowych, które mogą być wykorzystane do tworzenia i prezentowania sezonowo korygowanych wartości. Sezonowo skorygowana wartość usuwa efekt sezonowy z wartości, dzięki czemu trendy są wyraźniej widoczne. Wyróżnia się dwa podstawowe modele dla dekompozycji:

- model addytywny – gdy zmienność sezonowa jest stosunkowo stała w czasie,
- model multiplikatywny – gdy sezonowa zmienność rośnie w czasie [38], [49].

Szeregi czasowe stanowiące zapis sygnałów, które przetwarzane są z wykorzystaniem systemów informatycznych przybierają formę strumieni danych. Strumień danych to sekwencja cyfrowo zakodowanych spójnych sygnałów (pakietów danych) wykorzystywanych do przesyłania lub odbierania informacji, która jest w trakcie przesyłania [131], [132]. Strumień danych jest potencjalnie nieograniczoną, uporządkowaną sekwencją elementów danych, przesyłanych w czasie. Odstępy między przybyciem każdego elementu danych mogą się różnić. Te elementy danych mogą być prostymi parami wartości atrybutów jak relacje bazy danych lub bardziej złożonymi strukturami.

Nowoczesne sposoby pozyskiwania danych ze względu na wykorzystanie technologii informatycznych charakteryzuje duża prędkość akwizycji danych. Analiza strumieni danych w czasie rzeczywistym staje się kluczowym obszarem badań eksploracji danych [71].

Główne różnice pomiędzy strumieniami danych a konwencjonalnymi statycznymi zbiorami danych to:

- brak kontroli nad kolejnością w jakiej przychodzą dane – system przetwarzania powinien być gotowy do reagowania w każdej chwili,
- rozmiar danych – strumienie mogą obejmować dane z dni, miesięcy a nawet lat,
- brak jest możliwości zapisania wszystkich danych ze strumienia danych w pamięci,
- zazwyczaj możliwe jest tylko jednokrotne przetwarzanie elementów ze strumienia danych,
- duża szybkość pojawienia się nowych danych,
- etykietowanie danych może być bardzo kosztowne (a nawet niemożliwe w niektórych przypadkach) i może nie być natychmiastowe.

Charakterystyka strumienia danych wymaga odpowiednich algorytmów, które umożliwią ich skuteczną analizę. Takich, które nie wymagają uczenia

i przechowywania danych w skończonych, trwałych repozytoriach. Typowe algorytmy uczenia się wsadowego nie są w stanie spełnić wszystkich wymagań strumieniowania danych, takich jak ograniczenia użycia pamięci, ograniczony czas przetwarzania i skanowania przychodzących przykładów [9]. Ma to szczególne znaczenie w perspektywie IIoT gdzie strumień danych zawiera dane produkcyjne i jest zapisem bieżących parametrów maszyn i urządzeń systemu produkcyjnego [91].

### **2.4.3. Algorytmy dynamiczne**

W dynamicznym środowisku produkcyjnym zmian jest dużo i różny jest ich charakter – techniczny, organizacyjny czy zarządczy. Jeśli nie jest to środowisko wysokospecjalistyczne – takie jak zautomatyzowane, zrobotyzowane linie produkcyjne – to identyfikacja zmian w czasie rzeczywistym będzie stanowić ambitne zadanie. Zadanie to można rozpatrywać z dwóch perspektyw. Pierwsza z nich wiąże się z identyfikacją, a druga ze sposobem interpretacji. W perspektywie identyfikacji najważniejsze jest to, by wyrazić charakterystykę danego zjawiska w formie policzalnej. Tak by można było w wymiarze matematycznym wyrazić, że dany obiekt w danym momencie osiągnął następujący status, a w innym momencie ten status zmienił się. Druga kwestia to interpretacja. Interpretacja wymaga określenia zależności jak dane zjawiska będą przekładały się na decyzje. Interpretacja może być wykonana na bazie porównania do pewnych oczekiwanych wartości (normatywów) albo do stanu poprzedniego, uznanego za wzorcowy. Wymaga to zastosowania narzędzia, które działając na zagregowanych danych w odniesieniu do pożądanego kontekstu wydobędzie z nich informacje i pozwoli na ich interpretację.

Narzędzie to może przyjmować różną formę, ale najważniejsze jego dopasowanie do kategorii problemu. Przykładowo, jeśli tym narzędziem zostanie zidentyfikowany problem związany z mocowaniem części – należy opracować nowy techniczny sposób mocowania. W sytuacji, gdy praca na stanowisku realizowana jest chaotycznie i dochodzi do wielu niepotrzebnych działań należy opracować bądź wprowadzić techniki, które wyeliminują te nieprawidłowości, wykorzystując na przykład techniki szczupłej produkcji. Natomiast, gdy problem pojawia się na poziomie zarządzania, potrzebne jest rozwiązanie systemowe, które działa przekrojowo. Takie rozwiązania mogą mieć formę procedur stanowiących zapis gotowego algorytmu postępowania. Procedury porządkują działania i wykorzystują różne techniki, dobre praktyki, czy też algorytmy tak, by osiągnąć oczekiwane rozwiązanie problemu.

Wykonany na łamach rozdziału 2.3 przegląd nowoczesnych technologii przemysłu 4.0 wskazuje metody, dzięki którym można zrealizować niniejsze zadanie. Co więcej, sama nauka o danych [105] dostarcza wielu metod, algorytmów oraz sposobów analizy danych: od metody wektorów nośnych do spletanych sieci neuronowych. Wiele z tych metod wydaje się obiecujących

w perspektywie zastosowania na hali produkcyjnej. Niemniej jednak, pojawia się problem z pozyskaniem dużej ilości dobrych jakościowo danych. Wysoko zaawansowane metody są odpowiednie dla badań laboratoryjnych i w miarę stałych warunków produkcji. W przypadku dynamicznej identyfikacji i interpretacji, już w środowisku przemysłowym potrzebne są algorytmy, które przy ograniczonych możliwościach parametryzacji dostarczą przydatne rezultaty, bez względu na warunki w jakich pozyskane zostały dane, bądź jaka jest ich jakość.

Pojęcie algorytmu definiowane jest jako pewna ściśle określona procedura obliczeniowa, która dla właściwych danych wejściowych generuje dane wyjściowe, zwane wynikiem działania algorytmu. Algorytm jest więc ciągiem kroków obliczeniowych przekształcających dane wejściowe w wyjściowe [17]. To jakie dane przetwarza i kontekst w jakim definiowany jest algorytm typowo definiuje nazwę algorytmu bądź przypisuje mu kategorię [2]. W przypadku nazwy algorytmu to pochodzi od twórcy algorytmu (na przykład algorytm Dijkstry) bądź od charakterystyki algorytmu (na przykład algorytm wstecznej propagacji błędu) czy też zadania jakie algorytm wykonuje (sortowanie, przeszukiwanie). Natomiast kategoria definiowana jest przez nadrzędną regułę formułowania algorytmów (algorytmy genetyczne, algorytmy zachłanne), bądź typ danych jaki przetwarzają (algorytmy adaptacyjne, algorytmy grafowe).

W przypadku algorytmów dynamicznych literatura definiuje je adekwatnie do kategorii, w której występują. Na przykład w dziedzinie grafów planarnych wskazuje się, że algorytmy dynamiczne, to algorytmy, które dostarczają pewnych informacji o dynamicznie zmieniającym się grafie (czy dane wierzchołki grafu są połączone czy też nie) znacznie efektywniej niż poprzez ponowne obliczanie tych informacji od nowa po każdej aktualizacji. Dla tej kategorii algorytmów dynamicznych szczególne znaczenie, ma czas potrzebny algorytmowi na dostosowanie się do elementarnej zmiany grafu, oraz czas zapytania, czyli czas potrzebny algorytmowi na ponowne obliczenie żądanej części zachowanych informacji [24], [44].

Pojęcie algorytmów dynamicznych utożsamiane jest też z zagadnieniem programowania dynamicznego. Przy czym programowanie dynamiczne stanowi technikę formułowania stosowaną przeważnie do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych. Programowanie dynamiczne opiera się na podziale rozwiązywanego problemu na podproblemy względem kilku parametrów. W odróżnieniu od techniki dziel i zwyciężaj, podproblemy w programowaniu dynamicznym nie są rozłączne, ale musi je cechować własność optymalnej podstruktury [2]. Ponadto, pojęcie to potocznie kojarzone jest też układami regulacji w automatyce oraz algorytmami sterowania różnymi układami dynamicznymi i pozwalającymi na realizowanie postawionego celu [15], [23].

Podsumowując, w zależności od dyscypliny pojawia się wiele różnych interpretacji pojęcia algorytmów dynamicznych. To co charakterystyczne i podobne dla tych różnych interpretacji to fakt, że algorytmy te realizują

instrukcje by wykonać dane zadanie szybciej niż przeliczenie całej struktury różnorodnych dynamicznych danych reprezentujący jej aktualny stan i status. Dane te reprezentują wysoką częstotliwość zmian i najczęściej potrzebne są tylko na pewien określony czas. Dane dynamiczne określane są jako fakty służące analitycznym ocenom [133].

Dokładnie taki typ danych generowany jest przez system wytwarzania wraz z jego elementami w czasie rzeczywistym. Dlatego na potrzeby niniejszej pracy, ze względu na powiązania z zagadnieniami inżynierii produkcji, przyjmuje się, że algorytm dynamiczny to sposób przetwarzania danych generujący rezultaty na podstawie stale zmieniających się danych, które nie są opisane charakterystyką i napływają w czasie rzeczywistym w formie strumienia danych.

Algorytmami dynamicznymi można nazywać taką klasę algorytmów, która zajmuje się analizą danych dynamicznych w celu zapewnienia działania cyfrowej pętli sprzężenia zwrotnego. Oznacza to, że algorytm, który działa w ciągłej pętli i realizuje instrukcje w celu realizacji zadania przeliczenia w czasie krótszym niż podejście naiwne (wymagające przeliczenia całego zbioru, struktury danych od początku do końca) jest dynamiczny. Zatem do klasy algorytmów dynamicznych można zaliczyć zarówno algorytmy dekomponujące szeregi czasowe jak i algorytmy wykorzystujące metody sztucznej inteligencji. Przy czym metody sztucznej inteligencji operują na pewnej porcji danych wejściowych, które pozwolą nauczyć sieć neuronową poprawnej interpretacji szeregu. Tak nauczony model zyskuje możliwość prognozy bądź klasyfikacji szeregu w celu pozyskania informacji. Nawet sieci głębokiego uczenia potrzebują klasyfikatora, który pozwoli im finalnie wyodrębnić pożądane informacje. Biorąc jednak pod uwagę charakterystykę procesu technologicznego realizowanego przez maszynę w zmiennym otoczeniu (szczególnie MŚP), trudno jest zbudować bazę wzorcowych szeregów czasowych. Zakłada się, że dla produkcji wielkoseryjnej, która ze swojej natury będzie powtarzalna i stabilna, jest to możliwe i opłacalne.

Natomiast w perspektywie zmiennej produkcji typowej dla MŚP, ale i dużych przedsiębiorstw, może się to okazać trudne, a nawet nie możliwe. W tych warunkach, analiza danych musi być wykonana, bez wektora uczącego, w warunkach ciągłej zmiany. Dlatego potrzebny jest algorytm i metoda, która taką analizę wykona i wyodrębni dynamicznie poszukiwane wzorce. W związku z tym analiza szeregu skupia się na klasyfikacji, a nie prognozie. Klasyfikacja ta polega na wydzieleniu części strumienia danych, które są powtarzającym się wzorcem. W tym ujęciu ta klasyfikacja może opierać się na metodzie odległościowej wykorzystującej porównanie podsekwencji (fragmentu) strumienia danych sygnału charakteryzującego obserwowane zjawisko. Porównanie jest tu charakteryzowane przez wartość odległości pomiędzy podsekwencjami. W przypadku produkcji mogą to być drgania, zużycie energii elektrycznej, ciśnienie, temperatura i wiele innych. Obliczając kolejne różnice pomiędzy fragmentami strumienia, otrzymuje się charakterystykę obrazującą, które podsekwencje dzieli bliska bądź daleka odległość. Jest to podstawa do

wnioskowania o podobieństwie i może posłużyć do wskazania wzorca występującego w strumieniu. Co więcej może posłużyć do identyfikacji zaburzeń.

Metoda odległościowa wiąże się z dużą złożonością związaną z koniecznością obliczenia wielu odległości i wykonania wielu porównań. Z drugiej strony wykorzystuje ona dość prosty zestaw operacji matematycznych związanych z przyjęciem założonej odległości. Stanowi to znaczący atut w porównaniu z innymi zaawansowanymi metodami analizy strumieni danych, gdzie wymagane jest przyjęcie albo modelu analizy albo zapewnienie wektora danych uczących.

Wobec powyższych wymagań szczególną uwagę zwraca, wykorzystanie metody odległościowej do obliczenia charakterystyki strumienia danych określanego mianem profilu macierzowego (*ang. matrix profile, MP*) [114]. Profil macierzowy stanowi wektor odległości między każdą podsekwencją szeregu czasowego a jej najbliższym sąsiadem. Wektor oraz algorytmy jego obliczania zaproponowane zostały w roku 2016 przez zespół, któremu przewodzili Eamonn'a Keogh z Uniwersytetu Kalifornijskiego w Riverside oraz Abdullah'a Mueen z Uniwersytetu Stanu Nowy Meksyk [114]. Prace nad profilem macierzowym to odpowiedź na potrzebę szybkiego i dokładnego przetwarzania danych szeregów czasów związanych ze wzrostem ilości zastosowań i popularności technologii internetu rzeczy i chmury obliczeniowej. Dlatego profil macierzowy jako obiecujący sposób wykorzystania metody odległościowej, w perspektywie zagadnień rozprawy, zostanie szczegółowo scharakteryzowany i wykorzystany na łamach niniejszej pracy.

Opracowane przez zespół algorytmy obliczania charakterystyki szeregu czasowego poprzez uproszczenie operacji matematycznych metody odległościowej znacząco zmniejszyły złożoność obliczeń i pozwoliły na obliczenie profilu o wiele szybciej niż w sposób naiwny – do czego nawiązuje nazwa wektora.

Nazwa ta wynika z faktu, że jednym z najmniej efektywnych sposobów kalkulacji wektora odległości dwóch podsekwencji szeregu czasowego byłoby obliczenie macierzy pełnej odległości wszystkich sekwencji w jednym szeregu czasowym ze wszystkimi podsekwencjami w innym szeregu czasowym i wyodrębnienie najmniejszej wartości dla każdego elementu danej podsekwencji. To oczywiście wiąże się z dużą złożonością, a tym samym długim czasem obliczeń wszystkich odległości.

W celu szczegółowego przedstawienia tego podejścia konieczne jest wprowadzenie następujących definicji. Pierwsza z definicji dotyczy zdefiniowania typu przetwarzanych danych, czyli szeregów czasowych.

**Definicja 1:** Szereg czasowy  $T$  jest ciągiem liczb rzeczywistych  $t_i$ :  $T = t_1, t_2, \dots, t_n$ , gdzie  $n$  jest długością  $T$ .

W perspektywie definicji profilu macierzowego uwaga skupiona jest na wykazaniu podobieństwa pomiędzy poszczególnymi podsekwencjami.

**Definicja 2:** Podsekwencja  $T_{i,m}$ , z  $T$  jest ciągłym podzbiorem wartości  $T$  o długości  $m$ , zaczynając od pozycji  $i$ .

$$T_{i,m} = t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+m-1}, \text{ gdzie } 1 \leq i \leq n - m + 1.$$

W celu wskazania podobieństwa pomiędzy podsekwencjami należy obliczyć odległość danej podsekwencji do zbioru wszystkich podsekwencji szeregu. Uporządkowany wektor takich odległości określany jest mianem profilu odległości.

**Definicja 3:** Profil odległości  $D$  jest wektorem euklidesowych odległości między danym zapytaniem  $Q$ , a każdą podsekwencją w zestawie wszystkich podsekwencji. (gdzie  $Q$  oznacza poszukiwany w  $T$  wzorec lub zaburzenie)

Zakłada się, że odległość jest mierzona za pomocą odległości euklidesowej między podsekwencjami znormalizowanymi  $z$ . Profil odległości można uznać za charakterystykę szeregu (meta szereg czasowy), która opisuje szereg czasowy  $T$ , który został użyty do jego wygenerowania. Zwraca uwagę fakt, że jeśli zapytanie  $Q$  i wszystkie podsekwencje należą do tej samej serii czasowej, profil odległości musi być zerowy w miejscu zapytania i zbliżony do zera tuż przed i zaraz po nim. Takie dopasowania nazywane są dopasowaniami trywialnymi [114] i można ich uniknąć, ignorując strefę wykluczenia  $m / 2$  przed i po lokalizacji zapytania  $Q$ .

W celu analizy szeregu kluczowe jest połączenie podobieństwa wszystkich podsekwencji danego szeregu czasowego. Dlatego też zestaw wszystkich podsekwencji danego szeregu czasowego jest to zbiór, który zawiera wszystkie możliwe podsekwencje danego szeregu czasowego, co formalizuje poniższa definicja.

**Definicja 4:** Zbiór wszystkich podsekwencji  $A$  szeregu czasowego  $T$  jest uporządkowanym zbiorem wszystkich możliwych podsekwencji  $T$  uzyskanych przez przesuwanie okna o długości  $m$  przez

$$T: A = \{T_{1,m}, T_{2,m}, \dots, T_{n-m+1,m}\}, \text{ gdzie } m \text{ jest zdefiniowaną przez użytkownika długością podsekwencji. } A[i] \text{ stosowane jest do oznaczenia } T_{i,m}.$$

Pojęcie zbioru wszystkich podsekwencji służy wyłącznie celom notacji. W implementacji nie jest wyodrębniana podsekwencja we wskazanej formie, ponieważ wymagałoby to znacznego czasu i przestrzeni pamięci.

W kolejnym kroku istotna staje się relacja najbliższego sąsiada 1NN (*ang. first nearest neighbor*) pomiędzy podsekwencjami. Ze względu na to definiowana jest funkcja łączenia 1NN, która wskazuje relację najbliższego sąsiada między dwiema podsekwencjami.

**Definicja 5:** Funkcja łączenia 1NN: dla dwóch zbiorów wszystkich podsekwencji  $A$  i  $B$  oraz dwóch podsekwencji  $A[i]$  i  $B[j]$ , funkcja łączenia 1NN:  $\theta_{1nn}(A[i], B[j])$  jest funkcją logiczną, która zwraca wartość „prawda” tylko wtedy, gdy  $B[j]$  jest najbliższym sąsiadem  $A[i]$  w zbiorze  $B$ .

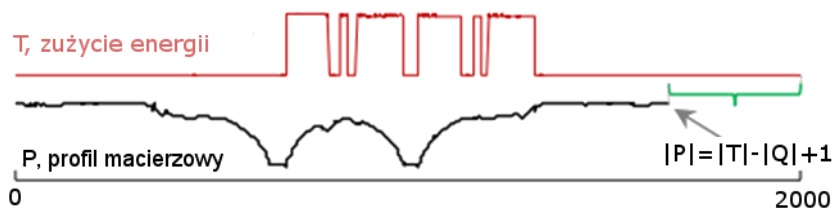
Dzięki zdefiniowanej funkcji łączenia można wygenerować zestaw łączenia podobieństwa poprzez zastosowanie operatora łączenia podobieństwa na dwóch zestawach wszystkich podsekwencji.

**Definicja 6:** Zestaw łączenia podobieństwa: dla zbiorów wszystkich podsekwencji  $A$  i  $B$ , zestaw łączenia podobieństwa  $J_{AB}$  z  $A$  i  $B$  jest zbiorem zawierającym pary każdej podsekwencji w  $A$  z najbliższym sąsiadem w  $B$ :  $J_{AB} = \{ \{A[i], B[j]\} | \theta_{1nn}(A[i], B[j]) \}$ . Formalnie oznacza się to jako  $J_{AB} = A \bowtie_{1nn} B$ .

Obliczana jest odległość euklidesowa między każdą parą w ramach zestawu podobieństwa, a wyniki przechowywane są w uporządkowanym wektorze. Wektor wynikowy nazywamy profilem macierzowym.

**Definicja 7:** Profil macierzowy (lub tylko profil)  $P_{AB}$  jest wektorem odległości euklidesowych między każdą parą w  $J_{AB}$ .

Zatem profil macierzowy to wektor odległości między każdą podsekwencją, a jej najbliższym sąsiadem. Przykładowy profil macierzowy dla danych zużycia energii prezentuje rysunek 25.



Rys. 25. Profil macierzowy  $P$  szeregu czasowego zużycia energii  $T$  oraz zapytania  $Q$  [114]

Podobnie jak profil odległości, profil macierzowy można uznać za charakterystykę szeregu (meta szereg czasowy) opisujący szereg czasowy  $T$ . Jeśli profil macierzowy jest generowany przez porównanie  $T$  z jego własnym zbiorem podsekwencji. W tym kontekście profil ma wiele interesujących i użytecznych właściwości. Na przykład najwyższy punkt w profilu odpowiada za zaburzenia szeregów czasowych, najniższe (powiązane) punkty odpowiadają lokalizacjom powtarzającym się w szeregu wzorców [56], a wariancję można postrzegać jako miarę złożoności szeregu czasowego  $T$ . Lokalizacje dwóch podsekwencji o minimalnej wartości profilu macierzy wskazują dokładnie pierwszą parę motywów [78]. Natomiast, zaburzenie szeregów czasowych jest podsekwencją, która ma maksymalną odległość do najbliższego sąsiada. Ten szczególnie przypadek zestawu łączenia podobieństwa (Definicja 6) nazywany jest zestawem łączenia podobieństwa własnego, a odpowiedni profil jako profil łączenia podobieństwa własnego bądź samopodobieństwa.

**Definicja 8:** Zestaw łączenia  $J_{AA}$  podobieństwa jest wynikiem połączenia podobieństwa zestawu  $A$  z samym sobą. Formalnie oznaczane jest to jako  $J_{AA} = A \bowtie_{1nn} A$ . Odpowiedni profil macierzy lub profil łączenia samopodobieństwa oznaczany jest jako  $P_{AA}$ .

Zaznacza się, że wykluczane są trywialne dopasowania, gdy wykonywane jest łączenie samopodobieństwa, to jest, jeśli  $A[i]$  i  $A[j]$  są podsekwencjami z tego samego zestawu wszystkich podsekwencji  $A$ ,  $\theta_{1nn}(A[i], B[j])$  jest „fałszem”, gdy  $A[i]$  i  $A[j]$  są trywialnie dobraną parą.

W profilu macierzowym  $i$ -ty element wskazuje odległość euklidesową do najbliższego sąsiada podsekwencji  $T$ , zaczynając od  $i$ . Jednak nie określa, gdzie znajduje się ten sąsiad. Informacje te są zapisywane w indeksie profilu macierzy.

**Definicja 9:** Indeks profilu macierzy  $I_{AB}$  zbioru podobieństw  $J_{AB}$  jest wektorem liczb całkowitych, w których  $I_{AB}[i] = j$  jeśli  $\{A[i], B[j]\} \in J_{AB}$ .

Przechowując w ten sposób informacje sąsiednie, można skutecznie określać najbliższego sąsiada  $A[i]$ , uzyskując dostęp do  $i$ -tego elementu w indeksie profilu macierzowego. Indeks profilu zawiera indeks pierwszej najbliższej podobnej podsekwencji. Jest to lokalizacja najbardziej zbliżonego fragmentu szeregu czasowego do danej podsekwencji. Przy czym funkcja, która oblicza zestaw łączący podobieństwo dwóch wejściowych szeregów czasowych, nie jest symetryczna; dlatego  $J_{AB} \neq J_{BA}$ ,  $P_{AB} \neq P_{BA}$  i  $I_{AB} \neq I_{BA}$ .

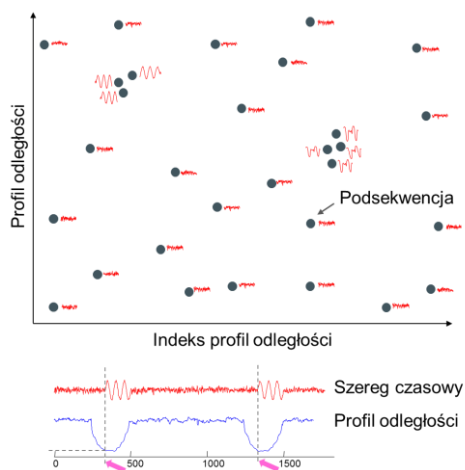
Zarówno profil macierzowy jak i indeks profilu pozwalają na eksplorację właściwości danego szeregu czasowego. Tak jak wskazano, może on służyć do wykazania wzorców jak i zaburzeń. W odniesieniu do profilu macierzowego

wzorzec jest powtarzającą się sekwencją w szeregu czasowym, a zaburzenie stanowią sekwencje nie powtarzające się, co ilustruje rysunek 26.



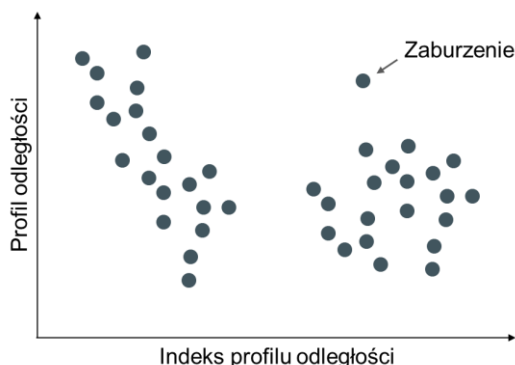
Rys. 26. Charakterystyka struktury profilu macierzy odległości [134]

Profil macierzowy oblicza odległości w przestrzeni euklidesowej, co oznacza, że odległość bliska 0 jest najbardziej podobna do innej podsekwencji w szeregu czasowym, a odległość daleka od 0, oznacza brak podobieństwa do jakiejkolwiek innej podsekwencji. Wyodrębnianie najmniejszych odległości wskazuje wzorce, a największe odległości pokazuje zaburzenia. Powyższą zależność można też zobrazować w przestrzeni dwuwymiarowej (Rys. 27).



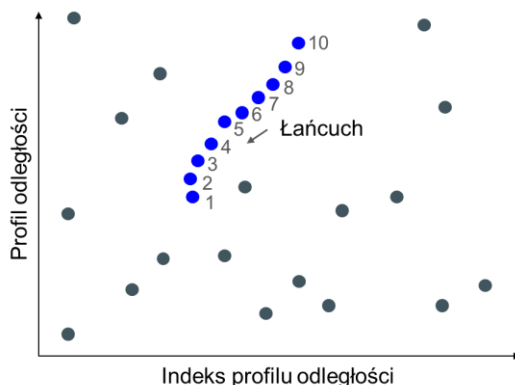
Rys. 27. Sposób identyfikacji wzorców [21]

Zagnieżdżone obszary w tej przestrzeni odpowiadają sekwencjom szeregu czasowego, które mają małą odległość bliską zeru. Te obszary reprezentują wzorce (Rys. 27). Natomiast zaburzenia w tym ujęciu reprezentowane są jako punkty odstające, co obrazuje rysunek 28.



Rys. 28. Zaburzenia ilustrowane jako punkty odstające [21]

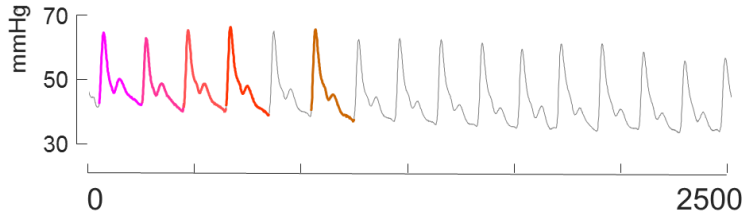
Profil macierzowy może też posłużyć do poszukiwania łańcuchów wzorców szeregu czasowego [118]. Łańcuchy wzorców szeregów czasowych są uporządkowanym czasowo zestawem wzorców podsekwencji, tak że każdy wzorec jest podobny do wzorca, który go poprzedzał, ale pierwszy i ostatni wzorec są nieznacznie różne (Rys. 29).



Rys. 29. Łańcuchów wzorców szeregu czasowego [21]

W porównaniu do motywów, gdzie odległość pomiędzy podsekwencjami jest mała w łańcuchu wzorców dopuszcza się większą odległość, która jest większa od średniej odległości wyznaczonej do określenia podsekwencji wzorca.

Zatem, za łańcuchy wzorców czasowych można uznać wzorce, które ewoluują lub dryfują w określonym kierunku w czasie. Łańcuchy wzorców szeregów czasowych mogą uchwycić ewolucję systemów i pomóc w sporządzeniu predykcji przyszłych wartości. Przykładowo tego typu zjawisko można zaobserwować dla ciśnienia tętniczego dorosłej osoby co ilustruje rysunek 30.



Rys. 30. Ciśnienie tętnicze osoby dorosłej i łańcuch wzorców szeregu czasowego [134]

Łańcuch charakteryzuje też kierunkowość, co wyraża fakt, że identyfikowane są podsekwencje następujące po sobie w szeregu czasowym.

**Definicja 10:** Łańcuch wzorców szeregu czasowego  $T$  jest uporządkowanym zbiorem podsekwencji:

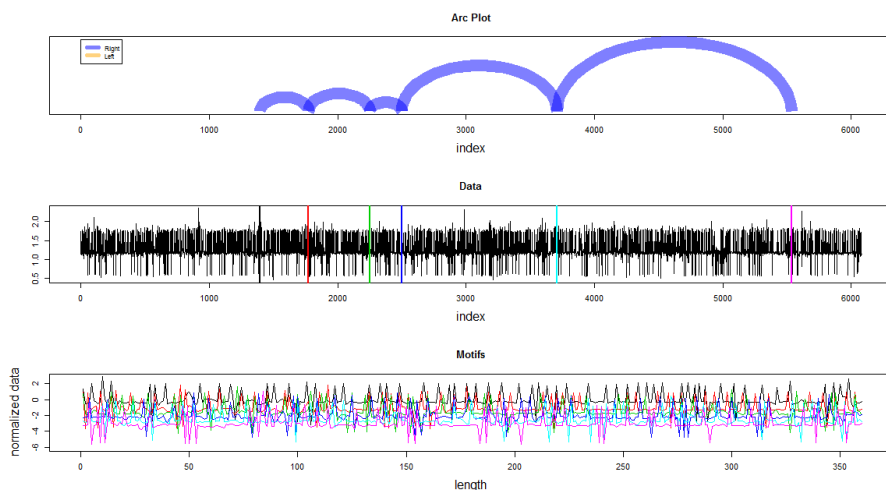
$TSC = \{T_{C1,m}, T_{C2,m}, \dots, T_{Ck,m}\} (C1 \leq C2 \leq \dots \leq Ck)$ , tak że dla dowolnego  $1 \leq i \leq k - 1$ , jest  $RNN(T_{Ci,m}) = T_{C(i+1),m}$  oraz  $LNN(T_{C(i+1),m}) = T_{Ci,m}$ . Długością łańcucha szeregów czasowych oznaczamy  $k$ , gdzie:  $T_{Ci,m}$  jest podsekwencją szeregu czasowego  $T$ , który ma długość  $m$  i zaczyna się od pozycji  $Ci$ .  $RNN(x)$  oznacza najbliższego prawego sąsiada  $x$  w  $T$ ,  $LNN(x)$  oznacza lewego najbliższego sąsiada  $x$  w  $T$ .

Zgodnie z powyższą definicją każda para kolejnych podsekwencji w łańcuchu musi być połączona zarówno do przodu, jak i do tyłu. Wskazanie do przodu, przedstawia najbliższego jej prawego sąsiada (*ang. right nearest neighbor, RNN*) to jest  $x \rightarrow y$  oznacza  $RNN(x) = y$  (podsekwencja późniejsza), a wskazanie do tyłu przedstawia najbliższego lewego sąsiada (*ang. left nearest neighbor, LNN*) to jest  $x \leftarrow y$  oznacza  $LNN(y) = x$  (podsekwencja wcześniejsza). W momencie, gdy dla pary podsekwencji zachodzi wzajemne wskazanie, to taki związek można uznać za łańcuch. Wyróżnia się dwa typy łańcuchów wzorców szeregów czasowych: łańcuchy zakotwiczone i niezakotwiczone.

**Definicja 11:** Zakotwiczony łańcuch wzorców szeregu czasowego  $T$  rozpoczynający się od podsekwencji  $T_{j,m}$  jest uporządkowanym zbiorem podsekwencji:

$TSC_{j,m} = \{T_{C1,m}, T_{C2,m}, \dots, T_{Ck,m}\} (C1 \leq C2 \leq \dots \leq Ck, C1 = j)$ , tak że dla każdego  $1 \leq i \leq k - 1$  jest  $RNN(T_{Ci,m}) = T_{C(i+1),m}$  oraz  $LNN(T_{C(i+1),m}) = T_{Ci,m}$  gdzie: dla  $T_{Ck,m}$  albo  $T_{Ck,m}$  to ostatnia podsekwencja w  $T$  lub  $LNN(RNN(T_{Ck,m})) \neq T_{Ck,m}$ .

Przykładowy zakotwiczony łańcuch wzorców szeregu czasowego obrazuje rysunek 31.



Rys. 31. Wyodrębniony przykładowy łańcuch wzorców

Źródło: Opracowanie własne

Ze wszystkich zakotwiczonych łańcuchów w szeregu czasowym  $T$  najdłuższy powinien odzwierciedlać najbardziej ogólny trend w danych. Ten łańcuch nazywany jest niezakotwiczonym łańcuchem wzorców szeregów czasowych.

**Definicja 12:** Niezakotwiczony łańcuch podsekwencji szeregu czasowego  $T$  jest najdłuższym łańcuchem szeregów czasowych w obrębie  $T$ .

Może istnieć więcej niż jeden niezakotwiczony łańcuch szeregów czasowych szeregów czasowych  $T$  o tej samej maksymalnej długości. W przypadku takich powiązań, za łańcuch niezakotwiczony uznawany jest ten z minimalną średnią odległością między kolejnymi składnikami.

Wykorzystując odpowiednie przekształcenia matematyczne można zmniejszyć złożoność obliczeń profilu macierzowego niż by wynikało to z podejścia podstawowego związanego z metodą odległościową.

W podstawowej wersji obliczenie profilu realizowane jest przy pomocy skalowalnego algorytmu obliczania profilu macierzowego (*ang. scalable time series anytime matrix profile, STAMP*) wykorzystującego algorytm poszukiwania podobieństwa (*ang. mueen's algorithm for similarity search, MASS*). Rozwinięciem tego algorytmu jest skalowany uporządkowany algorytm obliczania profilu macierzowego (*ang. scalable time series ordered matrix profile, STOMP*). Rozwinięta wersja porządkuje sposób obliczeń, który

w przypadku STAMP realizowany jest losowo. Ta operacja pozwala zmniejszyć złożoność i przyspieszyć obliczenia.

Obliczenie profilu macierzowego polega na użyciu znormalizowanej odległości euklidesowej jako miary podobieństwa poszczególnych podsekwencji. Algorytmy obliczające profil odległości wykorzystują metodę okna przesuwanego (*ang. sliding window*). Obliczenie profilu bazuje na wzorze (9) obliczenia znormalizowanej odległości euklidesowej  $D[i]$  między dwoma podsekwencjami szeregów czasowych  $Q$  i  $T_{i,m}$  przy użyciu ich iloczynu skalarnego,  $QT[i]$ .

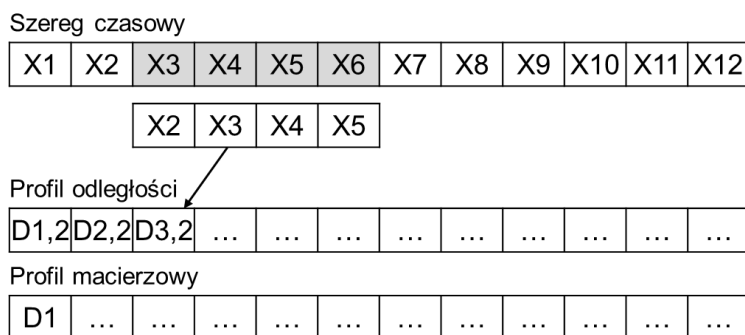
$$D[i] = \sqrt{2m \left( 1 - \frac{QT[i] - m\mu_Q M_T[i]}{m\sigma_Q \Sigma_T[i]} \right)} \quad (9)$$

gdzie:  $m$  jest długością podsekwencji,  $\mu_Q$  jest średnią zapytania  $Q$ ,  $M_T[i]$  jest średnią  $T_{i,m}$ ,  $\sigma_Q$  jest odchyleniem standardowym  $Q$ , a  $\Sigma_T[i]$  jest odchyleniem standardowym  $T_{i,m}$ .

Obliczenie iloczynu skalarnego w dziedzinie czasu  $i$  jest iloczynem w dziedzinie częstotliwości, który wykonywany jest przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Algorytm oblicza mnożenie dwóch złożonych wektorów i wykonuje odwrotną FFT na wyniku mnożenia. Zwykle obliczenie średniej i odchylenia standardowego dla każdej podsekwencji długiego szeregu czasowego zajmuje  $O(m)$ . Zmiana polega na tym, że buforowane są skumulowane sumy wartości i kwadrat wartości w szeregach czasowych. Na każdym etapie dwa wektory sumaryczne są wystarczające do obliczenia średniej i odchylenia standardowego dowolnej podsekwencji o dowolnej długości. Algorytm obliczeń stanowi serię kroków. W pierwszym kroku wyodrębnia się długość  $T_B$ . W drugim kroku alokowana jest pamięć i początkowy profil macierzy  $P_{AB}$  i indeks profilu macierzy  $I_{AB}$ . Następnie obliczane są profile odległości  $D$  na podstawie każdej podsekwencji  $B[idx]$  w szeregach czasowych  $T_B$  i szeregach czasowych  $T_A$ , gdzie  $idx$  oznacza wybrany indeks zbioru podsekwencji  $T_B$ . Następnie obliczane jest minimum parami dla każdego elementu w  $D$  ze sparowanym elementem w  $P_{AB}$  to jest  $Min(D[i], P_{AB}[i])$  dla  $i = 0$  do  $długość(D) - 1$ . Aktualizowany jest również  $I_{AB}[i]$  z  $idx$ , gdy  $D[i] \leq P_{AB}[i]$ , gdy wykonywana jest operacja wskazania minimum parami. Na koniec zwracany jest wynik  $P_{AB}$  i  $I_{AB}$ . Zatem przy rozmiarze okna  $m$ , algorytm:

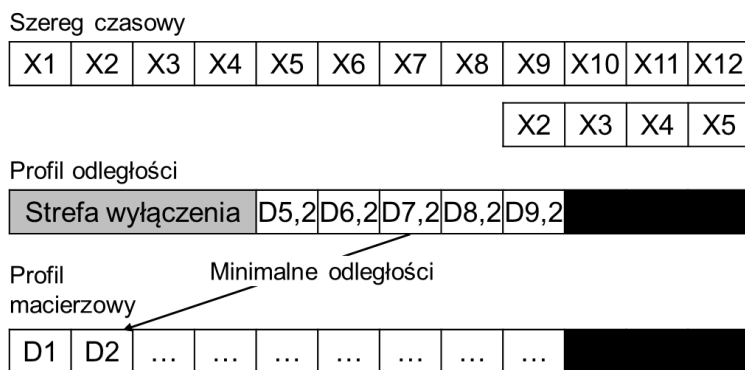
1. Oblicza odległości dla podsekwencji w stosunku do całego szeregu czasowego.
2. Ustawia strefę wyłączenia, aby ignorować trywialne dopasowania.
3. Aktualizuje profil odległości o wartości minimalne.
4. Ustawia pierwszy indeks najbliższej sekwencji.

Wizualizacja pokazująca obliczenie profilu odległości dla zapytania  $Q$  rozpoczynającej się od drugiego elementu o długości  $m$  pokazana na rysunku 32. Podsekwencja od elementów  $X_2$  do  $X_5$  przesuwa się w szeregu czasowym, obliczając iloczyn skalarny dla każdego elementu  $n$  szeregu.



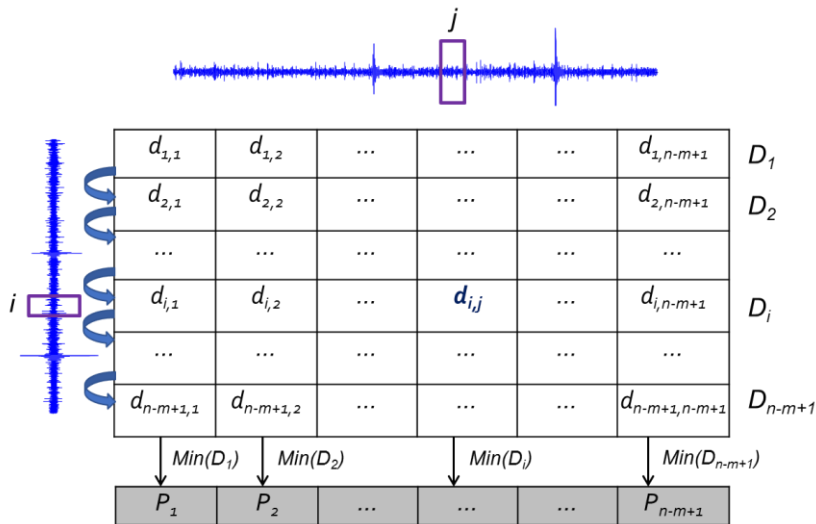
Rys. 32. Obliczanie odległości dla danej sekwencji [134]

Po obliczeniu wszystkich skalarów strefa wykluczenia jest pomijana, a minimalna odległość jest zapisywana w profilu macierzowym, co ilustruje rysunek 33.



Rys. 33. Wybór pod sekwencji o najbliższej odległości [134]

Tak prowadzona procedura prowadzi do obliczenia profilu macierzowego. Sposób obliczania profilu kompleksowo prezentuje rysunek 34.



Rys. 34. Obliczenie profilu macierzowego [21]

gdzie:  $d_{i,j}$  – jest odległością między  $i$ -tą podsekwencją, a  $j$ -tą podsekwencją,

$D$  – profil odległości,  $P$  – profil macierzowy,  $m$  – długość podsekwencji,  $n$  – długość szeregu

Obliczenie profilu z wykorzystaniem jednego wątku procesora Intel® Core i7-7700, 3,60 GHz do przeliczenia losowego zestawu 40 000 elementów za pomocą obliczenia algorytmu STOMP, dla okna  $m=1000$  zajmuje 136,01 sekundy, a algorytmu STAMP zajmuje 262,03 sekundy.

Do cech profilu macierzowego zalicza się [114]:

- dokładność – w przypadku odkrywania motywów, wykrywania rozbieżności czy szeregów wzorców czasowych – metody oparte na profilu nie dają fałszywych wyników lub fałszywych odwołań,
- ograniczona parametryzacja – w porównaniu do innych metod wygenerowanie profilu nie wymaga szczegółowej parametryzacji, wystarczy tylko wskazanie okna porównania  $m$ ,
- nie wymaga zapewnienia liniowej przestrzeni pamięci do obliczeń odpowiedniej do wielkości zbioru – liczony jest tylko profil macierzy, co wymaga znacznie mniej przestrzeni niż przetworzenie całej próbki, to pozwala na przetwarzanie masywnych zbiorów danych w pamięci głównej,
- może być tworzony przy pomocy różnych algorytmów,
- ma możliwość aktualizacji – po obliczeniu profilu macierzy dla zbioru danych można go stopniowo aktualizować,
- brak potrzeby określenia progu podobieństwa – nie wymaga od użytkownika ustawiania progów podobieństwa/odległości,
- równoległość – macierz można generować zarówno na procesorach wielordzeniowych, jak i w systemach rozproszonych,

- profil można obliczać w czasie deterministycznym – biorąc pod uwagę tylko długość szeregu czasowego, można dokładnie przewidzieć z góry, ile czasu zajmie obliczenie profilu macierzy.

Podsumowując, do kluczowych zalet wektora profilu macierzowego i metody jego wyznaczania zalicza się to, że jest ona niezależna od domeny danych i zapewnia dokładne rozwiązanie. Wymaga określenia tylko jednego parametru długości okna zakresu podsekwencji, w stosunku do której będzie wykonane porównanie. To otwiera dużą perspektywę rozwiązań w zakresie analizy danych szeregów czasowych.

#### **2.4.4. Podsumowanie**

Podsumowując, dynamiczne środowisko procesów produkcyjnych wymaga zastosowania odpowiednich sposobów przechowywania danych, które napływają nieregularnie. Zmienia się zarówno ich wolumen, jak i struktura. W związku z nowymi sposobami pozyskiwania danych z wykorzystaniem rozwiązań przemysłu 4.0, a przez to dostępnością dużych wolumenów dynamicznych danych, potrzebne są nowe techniki ich przetwarzania.

Wykorzystując nowe sposoby przetwarzania danych możliwa jest ich dynamiczna analiza. Nowe metody analizy danych otwierają perspektywę do formułowania nowych algorytmów dynamicznych, które stanowią sposób wydobycia informacji o statusie systemu wytwarzania z różnych dynamicznych sygnałów, szybką reakcję na zdarzenia katastroficzne, identyfikację możliwych przyczyn zdarzeń niepożądanych czy określenie parametrów istotnych dla efektywności systemu wytwarzania.

### **3. Poprawa efektywności systemu wytwarzania**

#### **3.1. Założenia wstępne**

Zgodnie ze zdefiniowanym zakresem pracy przeprowadzono badania doświadczalne w przedsiębiorstwie produkcyjnym zajmującym się wytwarzaniem części dla przemysłu maszynowego, lotniczego, zbrojeniowego, energetycznego i motoryzacyjnego. Kadre przedsiębiorstwa stanowi czterdziestu pracowników. W przedsiębiorstwie obowiązuje liniowa hierarchiczna odpowiedzialność za realizowane zadania. Najbardziej rozbudowany pod względem liczby stanowisk jest dział produkcji. Przedsiębiorstwo organizuje produkcję w ramach produkcji gniazdowej i realizuje ją dla różnorodnych zleceń na bieżąco – nie prowadzi produkcji na magazyn. Zakład ze względu na zatrudnienie jak i przychody zalicza się do klasy małych i średnich przedsiębiorstw. Ze względu na specyfikę przedsiębiorstwa wszelkie informacje na jego temat w niniejszej pracy zostały zanonimizowane.

Uwarunkowania pracy w warunkach produkcyjnych różnią się od badań w warunkach laboratoryjnych. Warunki laboratoryjne pozwalają na prowadzenie badań niezależnie od czynników zewnętrznych. Natomiast działanie w środowisku produkcyjnym wiąże się z aspektem nagłych, w większości nieprzewidywalnych zmian. Prowadzenie badań w takim środowisku jest związane z uzależnieniem prowadzenia badań od toku pracy przedsiębiorstwa. Z drugiej strony tylko w warunkach realnej produkcji można wiarygodnie weryfikować aplikacyjność opracowanych narzędzi i algorytmów. Badania doświadczalne mają za zadanie odpowiedzieć na pytanie, czy zaproponowane rozwiązanie spełnia stawiane mu wymagania.

W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych związanych z zakresem rozprawy konieczne było przyjęcie warunków prowadzenia badań narzuconych przez przedsiębiorstwo. Uwarunkowania dotyczyły formy, zasad oraz decyzji związanych z faktem prowadzenia badań w prężnie działającym środowisku produkcyjnym. Konieczne było przyjęcie szeregu założeń jak i taktycznych decyzji. Wszystkie kwestie dotyczące badań jak i stanowiska badawczego były konsultowane z kierownikiem wydziału bądź kierownikiem produkcji. W przypadku braku akceptacji proponowanych rozwiązań – autor proponował nowe, aż do ustalenia możliwego zakresu rozwiązań. Kluczowe ograniczenie nałożone przez przedsiębiorstwo dotyczyło harmonogramu produkcji. Badania mogły być prowadzone, ale nie mogły pod żadnym względem ingerować albo przeszkadzać w realizacji procesu produkcyjnego. Na maszynach objętych badaniami realizowane były zlecenia produkcyjne w ramach określonego harmonogramu. Autor nie posiadał możliwości zmiany tego harmonogramu za to mógł obserwować jego realizację.

Ze względu na warunki gwarancyjne, bezpieczeństwo, brak interfejsów komunikacyjnych maszyn, brak sieci przewodowej jak i bezprzewodowej, autor nie miał dostępu do wewnętrznych systemów maszyn technologicznych. Umożliwiona za to została możliwość budowy bezprzewodowej sieci komputerowej wraz z instalacją czujników na wytypowanych maszynach systemu wytwarzania przedsiębiorstwa.

W celu identyfikacji statusu procesu technologicznego realizowanego na maszynach jako sygnał obrazujący działanie maszyn przyjęto drgania mechaniczne. Drgania towarzyszą większości działań maszyn wykonujących procesy obróbcze. Jako wielkość opisującą amplitudę drgań wybrano przyspieszenie drgań.

Przeprowadzone badania miały charakter eksperymentalny i koncepcyjny, dlatego koncentrowały się na jednym sygnale. Rozszerzenie liczby sygnałów powodowałoby wzrost zakresu badań, związanych z dodatkowym opisem charakterystyki nowego sygnału jak i rozważeniem jego korelacji z dotychczas pozyskiwanym. Ilość notowanych sygnałów może w przyszłości być rozszerzona i dostosowana do charakteru produkcji. Dla innych procesów można pozyskiwać dane temperatury, wilgotności, ciśnienia i inne.

W odpowiedzi na uwarunkowania jak i zdefiniowany zakres i tezy, sformułowano założenia przeprowadzonych badań:

- rejestrowany sygnał wykonywanej obróbki stanowi ciąg czasowy wartości przyspieszenia będąc miarą amplitudy drgań mechanicznych. Przyspieszenie rejestruje akcelerometr zamontowany na korpusie maszyny. Ilość oraz dokładność odwzorowania zależna jest od jakości i czułości akcelerometru i układu przetwornika analogowo-cyfrowego. Zatem rejestrowany jest sygnał dyskretny, który stanowi strumień danych,
- strumień danych można przysyłać, przetwarzać adekwatnie do mocy zastosowanych komputerów i przepustowości sieci,
- maszyna produkcyjna realizuje operacje wynikające z harmonogramu, który w zautomatyzowanym procesie produkcyjnym jest opisany przez program komputerowy wykonywany przez tę maszynę. Dla każdej poddawanej obróbce części z jednej partii produkcyjnej, program jest ten sam,
- rejestrowany sygnał związany z fazą obróbki dla każdej części będzie podobny pod warunkiem, że program obróbki nie zostanie przerwany przez operatora lub z powodu awarii wykrytej przez systemy diagnostyczne. Taka sytuacja będzie wymagała dodatkowej obsługi, której czas zostanie zarejestrowany w ciągu czasowym, stąd w analizowanym sygnale można znaleźć pewne powtarzające się przedziały czasowe – w których można dostrzec powtarzający się wzorzec,

- wyodrębnienie wzorca pozwala określić jaka część sygnału odpowiada za obróbkę, a jaka za obsługę procesów pomocniczych. Tym samym wyodrębnienie odpowiedniego wzorca oznacza, że maszyna realizuje proces technologiczny dla obróbki lub są realizowane procesy obsługowe,
- obróbka każdej części wymaga obsługi. Czas obsługi stanowi czas przygotowawczo-zakończeniowy. W praktyce produkcyjnej można przyjąć, że czas ten zależy w głównej mierze od czasu pracy operatora,
- operator ma za zadanie zdemontować obrobioną część, oczyścić obszar roboczy maszyny, dokonać kontroli obszaru roboczego oraz zamontować nową część poddaną obróbce. Operator w przypadkach stwierdzenia niesprawności narzędzia lub przyrządu obróbkowego dokonuje jego wymiany lub zgłasza służbom utrzymania ruchu zaistniały problem. Skutkuje to czasową przerwą w pracy stanowiska. Czas wykonania powyższych zadań operatora uzależniony jest od jego umiejętności, doświadczenia, znajomości procesu technologicznego jak i motywacji. Zatem czas wykonania zadań nie jest stały stąd czas pomiędzy wykonaniem kolejnych części może się różnić. W czasie obsługi przez operatora maszyna działa na biegu jałowym. Oznacza to, że napęd wrzeczona obrabiarki i ruchów posuwowych jest wyłączony,
- dostępność maszyny zależy od tego, ile czasu wykonuje obróbkę, a ile czasu zajmują czynności obsługowe. Zatem kluczowe jest ustalenie jaki jest status danej maszyny i czy wykonuje ona obróbkę, czy też pracuje na biegu jałowym. Tak zdefiniowany status stanowi podstawę określenia czasu obróbki i czasu przygotowawczo-zakończeniowego. To daje podstawę do ustalenia efektywności danej maszyny jak i całego systemu wytwarzania. Dla systemu wytwarzania suma czasów obróbki wraz z sumą czasów przygotowawczo-zakończeniowych pozwoli wyznaczyć efektywność całego systemu,
- opóźnienie wykonania operacji na jednym stanowisku przez dłuższy czas, może powodować brak części do obróbki na następnych stanowiskach w cyklu produkcyjnym. Taka sytuacja może być wykryta na podstawie analizy sygnałów z innych maszyn,
- wyznaczenie wskaźnika efektywności pozwala na formułowanie usprawnień dotyczących systemu wytwarzania w wymiarze harmonogramu produkcji i realizacji zleceń, planów działania służb utrzymania ruchu, czy też w zakresie wewnętrznej organizacji i wzrostu produktywności,

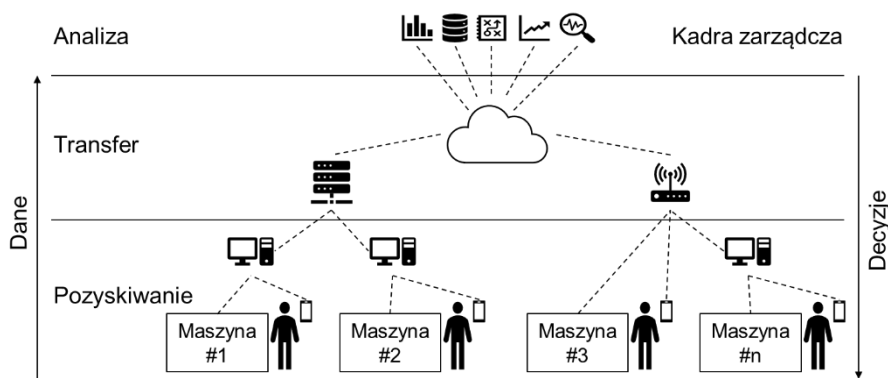
- brak wyznaczenia wskaźnika efektywności uniemożliwia określenie czy zasoby dysponowane przez przedsiębiorstwo są adekwatnie wykorzystane. Może to decydować o konkurencyjności przedsiębiorstwa w stosunku do innych na rynku. Zatem niezbędne jest poszukiwanie nowych, ekonomicznie skutecznych sposobów pozyskiwania i przetwarzania danych dla wykazania efektywności.

Przeprowadzenie badań w świetle przyjętych założeń związane było z wymogiem zorganizowania poszczególnych elementów systemu pozyskiwania danych, to jest wdrożenie narzędzi pomiaru i centralnego przetwarzania danych. W celu realizacji tego zadania wykorzystano nowoczesne technologie i rozwiązania systemów informatycznych, a dokładnie technologię chmury obliczeniowej jak i przemysłowy internet rzeczy. Aplikacyjny charakter nadano im w drodze zastosowania w systemie wytwarzania. W ramach rozwiązań przemysłowego internetu rzeczy możliwe było wykorzystanie prostych, niskobudżetowych czujników, odpowiednio zabezpieczonych przed niekorzystnymi czynnikami środowiska produkcyjnego. Chmura obliczeniowa stanowi sposób na zapewnienie możliwości dynamicznego pozyskiwania dużych zbiorów danych – bez inwestycji w zaawansowaną infrastrukturę komputerową. Opracowano rozwiązanie, które pozwoli na uzyskanie poprawy efektywności systemu wytwarzania w kontekście harmonogramu jak i utrzymania ruchu.

### **3.2. Strategia prowadzenia badań**

Ze względu na uwarunkowania oraz zakres pracy przyjęto odpowiednią strategię prowadzenia badań doświadczalnych. Wyrażoną jako plan prowadzenia badań, który opisano w ramach niniejszego rozdziału.

Przedmiotem badań był sygnał drgań mechanicznych, a miarą amplitudy drgań przyspieszenia. Przyspieszenia rejestrowano przez akcelerometr w osiach x, y, z. Mierzono wartość skuteczną drgań. Akcelerometr wbudowany w układ inteligentnego czujnika zasilanego baterią i posiadający moduł bezprzewodowej komunikacji przymocowany był do punktu pomiarowego przy pomocy magnesu w obszarze roboczym. Rejestrowany sygnał przetwarzano przez wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy i w formie szeregu czasowego bezprzewodowo przesyłano do komputera lokalnego przy pomocy połączenia Bluetooth Low Energy (BLE). Zadaniem komputera była wstępna obróbka danych polegająca na usunięciu dodatkowych znaczników generowanych przez układ inteligentnego czujnika. Następnie komputer przysyłał dane dalej do poziomu chmury obliczeniowej. Otrzymany szereg czasowy jako strumień danych przesyłano do środowiska analitycznego i przetwarzano z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych. Poglądowy schemat docelowego rozwiązania przedstawia rysunek 35.



Rys. 35. Poglądowy schemat docelowego rozwiązania

Źródło: Opracowanie własne

Przetwarzanie szeregu czasowego koncentruje się na wyodrębnieniu wzorców w pozyskiwanym strumieniu danych obrazującym powtarzalną pracę maszyny. Wzorec to powtarzające się przedziały czasowe strumienia danych prezentujących sygnał drgań, który charakteryzuje niewielka różnica amplitudy drgań. Dla każdej poddawanej obróbce części z jednej partii produkcyjnej, program jest ten sam. Maszyna produkcyjna wykonuje powtarzalną obróbkę według zadanego programu, realizuje kolejne komendy programu bądź operatora. Maszyna produkcyjna realizuje pewne operacje wynikające z harmonogramu, który w zautomatyzowanym procesie produkcyjnym może być opisywany przez program komputerowy wykonywany przez tę maszynę. Dlatego też, rejestrowany strumień danych związany z fazą obróbki dla każdej części się powtarza.

Przyjęto, że miarą statusu maszyny jest wyodrębnienie wzorca procesu obróbki w analizowanym strumieniu danych. Wyodrębnienie wzorca pozwala na określenie czasu operacyjnego maszyny. Różnica pomiędzy całkowitym czasem dostępnym (czas zamówiony – najczęściej zmiana robocza), a sumą czasów obróbki stanowi czas, w którym maszyna działa na biegu jałowym bądź uległa awarii. Im bardziej regularny strumień, tym większa ilość wyodrębnionych wzorców – dłuższy czas operacyjny maszyny. Natomiast im mniej regularny strumień – duża ilość zaburzeń – tym mniejsza liczba wyodrębnionych wzorców, a zatem krótszy czas operacyjny. Zaburzenie wskazuje natomiast moment, gdy proces obróbki odbiegał od stanu normatywnego. Ta podsekwencja nie powtarza się w analizowanym sygnale. Na tej podstawie algorytm wskazuje moment wystąpienia zaburzenia. Ustalenie przyczyny zaburzenia wymaga uwagi służb utrzymania ruchu. Daje informację dla operatora, że powinien zwrócić szczególną uwagę na ten etap obróbki. Natomiast łańcuch wzorców wskazuje występujące kolejno po sobie wzorce, które różni niewielka odległość. Te zależności wpływają zarówno na efektywność poszczególnych maszyn, ale przede wszystkim na efektywność całego systemu.

Odpowiednio wskazanym zależnościom definiowany jest wskaźnik OEE. Miara dostępności poszczególnej maszyny reprezentowana jest poprzez stosunek czasu obróbki (czasu wykorzystanego) do czasu całkowitego dostępnego (na przykład czas zmiany), czyli okresu, dla którego liczony jest wskaźnik.

$$\text{dostępność}_{\text{masz}} = \frac{\text{czas operacyjny maszyny}}{\text{całkowity dostępny czas}} \quad (10)$$

gdzie:  $\text{dostępność}_{\text{masz}}$  – oznacza wskaźnik dostępności danej maszyny.

Dalej miara wydajności stanowi iloraz wolumenu zrealizowanej produkcji (zidentyfikowana liczba wykonanych części) podzielona przez czas operacyjny, a następnie przez normatywny jednostkowy czas obróbki. Wydajność rzeczywista nie jest mierzona – wymaga zamodelowania bądź wskazania przez operatora.

$$\text{wydajność}_{\text{masz}} = \frac{\frac{\text{produkcja wykonana}}{\text{czas operacyjny}}}{\text{normatywny jednostkowy czas obróbki}} \quad (11)$$

gdzie:  $\text{wydajność}_{\text{masz}}$  – oznacza wskaźnik wydajności danej maszyny.

Miara jakości reprezentowana jest przez ilość braków w stosunku do produkcji wykonanej. W przypadku zastosowanych algorytmów, ilość braków nie jest wyliczana przez algorytm, wymaga zamodelowania bądź wskazania przez operatora.

$$\text{jakość}_{\text{masz}} = \frac{\text{produkcja wykonana} - \text{braki}}{\text{produkcja wykonana}} \quad (12)$$

gdzie:  $\text{jakość}_{\text{masz}}$  – oznacza wskaźnik jakości danej maszyny.

Zatem miara efektywności maszyny wyznaczana jest za pomocą wskaźnika OEE. Wskaźnik ten wyznaczany jest jako iloczyn miary dostępności, miary wydajności i miary jakości dla danej maszyny.

$$\text{OEE}_{\text{maszyny}} = \text{dostępność}_{\text{masz}} * \text{jakość}_{\text{masz}} * \text{wydajność}_{\text{masz}} \quad (13)$$

gdzie:  $\text{OEE}_{\text{maszyny}}$  – oznacza wskaźnik efektywności danej maszyny.

Miarą efektywności całego systemu wytwarzania określana jest za pomocą ogólnego wskaźnika OEE wyznaczonego dla sumy czasu dostępnego, sumy czasu

operacyjnego, średniej wartości czasu jednostkowego obróbki oraz średniej wartości braków dla wszystkich maszyn.

$$\text{dostępność}_{\text{sys\_wyt}} = \frac{\sum \text{czas operacyjny maszyny}}{\sum \text{całkowity dostępny czas}} \quad (14)$$

gdzie:  $\text{dostępność}_{\text{sys\_wyt}}$  – oznacza wskaźnik dostępności systemu wytwarzania.

$$\text{wydajność}_{\text{sys\_wyt}} = \frac{\frac{\sum \text{produkcja wykonana}}{\sum \text{czas operacyjny}}}{\text{średni normatywny jednostkowy czas obróbki}} \quad (15)$$

gdzie:  $\text{wydajność}_{\text{sys\_wyt}}$  – oznacza wskaźnik dostępności systemu wytwarzania.

$$\text{jakość}_{\text{sys\_wyt}} = \frac{\sum \text{produkcja wykonana} - \sum \text{braki}}{\sum \text{produkcja wykonana}} \quad (16)$$

gdzie:  $\text{jakość}_{\text{sys\_wyt}}$  – oznacza wskaźnik jakości systemu wytwarzania.

$$\text{OEE}_{\text{sys\_wyt}} = \text{dostępność}_{\text{sys\_wyt}} * \text{wydajność}_{\text{sys\_wyt}} * \text{jakość}_{\text{sys\_wyt}} * 100\% \quad (17)$$

gdzie:  $\text{OEE}_{\text{sys\_wyt}}$  – oznacza wskaźnik efektywności systemu maszyny.

Dysponując zarówno ogólnym wskaźnikiem efektywności jak i szczegółowymi wartościami możliwe jest wytypowanie maszyn najmniej i najbardziej efektywnych. A w perspektywie cyklu produkcyjnego wyrobu pojawia się możliwość wykazania maszyn, które zaniżają ogólną efektywność systemu wytwarzania. Takie zadanie może być wykonane zarówno w przypadku układu szeregowego jak i równoległego maszyn w cyklu. Opóźnienia wykonania operacji na jednym stanowisku przez dłuższy czas mogą spowodować brak części do obróbki na następnych, w cyklu produkcyjnym, stanowiskach. Taka sytuacja może być wykryta na podstawie wykorzystania algorytmów do monitorowania maszyn w czasie rzeczywistym. Przyjęto, że taki sposób obliczeń pozwoli charakteryzować efektywność produkcji i być podstawą do realizacji zadań poprawy efektywności.

Punktem wyjścia dotyczącym obliczeń jest dostępność danych. Na podstawie ich analizy z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych pojawia się możliwość podjęcia działań zarówno w zakresie zmian harmonogramu, jak i w zakresie organizacji utrzymania ruchu.

W związku z powyższym autor w ramach stanowiska badawczego i przy użyciu dostępnych narzędzi sporządził eksperymentalny system, którego zadaniem jest pozyskiwanie, przetwarzanie danych z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych.

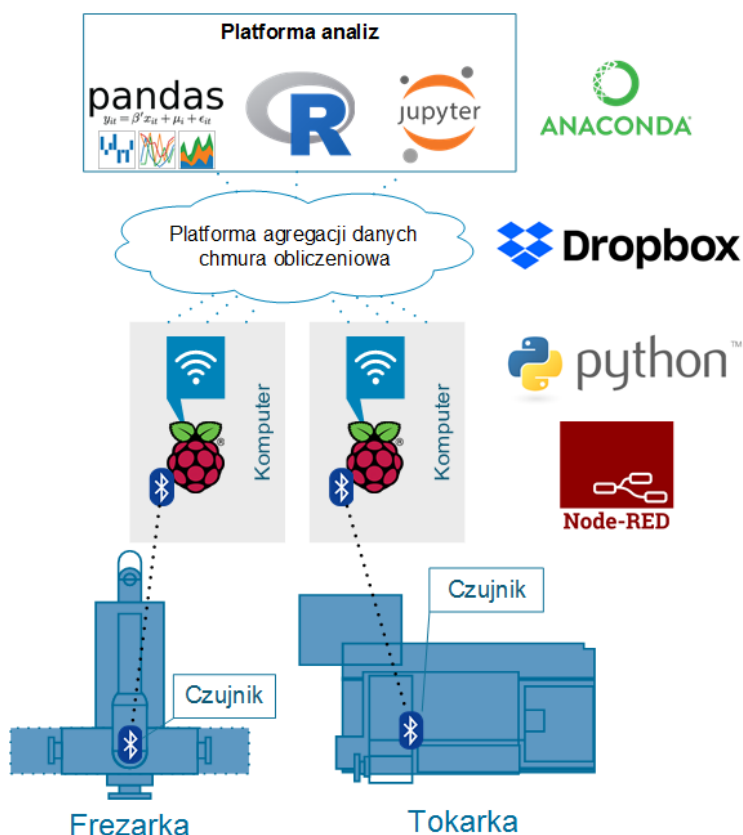
### **3.3. Badania doświadczalne**

#### **3.3.1. Stanowisko badawcze**

W celu przeprowadzenia badań zgodnie ze zdefiniowanym zakresem rozprawy przygotowano stanowisko badawcze, które zostało wydzielone z systemu wytwarzania przedsiębiorstwa. Do badań wytypowano maszyny, których obciążenie zleceniami było największe. Wybrane maszyny pracują w trybie dwuzmianowym, a obłożenie pracy maszyn zależy bezpośrednio od wielkości i charakterystyki zleceń. Zlecenia obejmują produkcje standardowych części jak i prace nad uruchomieniem nowych. Utworzone stanowisko badawcze składało się z następujących elementów:

- wybranych maszyn produkcyjnych,
- narzędzi przeprowadzenia pomiarów,
- narzędzi przesyłania i agregacji danych,
- platformy agregacji danych,
- środków wstępnego przetwarzania danych,
- narzędzi analitycznych przetwarzania dużych zbiorów danych.

W porozumieniu z przedstawicielami przedsiębiorstwa ustalono zakres prac badawczych na stanowiskach roboczych. Ustalono, że prowadzone badania nie mogą naruszać pracy maszyn oraz niedopuszczalne było instalowanie czujników, które w jakikolwiek sposób naruszałoby korpus danej maszyny. Możliwa za to była budowa sieci bezprzewodowej wraz z instalacją komputerów w przestrzeni hali. Dopuszczalne było też instalowanie czujników za pomocą sposobów nie wymagających ingerencji w korpus maszyn. Schemat przygotowanego stanowiska badawczego do przeprowadzenia badań eksperymentalnych zaprezentowano na rysunku 36.

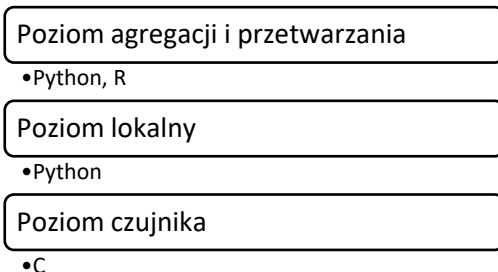


Rys. 36. Schemat stanowiska badawczego  
Źródło: Opracowanie własne

Szczegółowo struktura stanowiska obejmuje następujące elementy:

- Centrum frezarskie MIKRON UCP 800 DURO,
- Tokarka CNC TUR MN 560x2000,
- Bezprzewodowy zintegrowany czujnik – Texas Instruments Sensor Tag CC2650,
- Komputer – Raspberry Pi 3 model B+ z Wifi 2.4 i 5GHz z Bluetooth 4.2, wraz z uruchomioną usługą Node-Red oraz bibliotekami języka Python,
- Platforma agregacji danych w platformowym modelu chmury obliczeniowej – Dropbox,
- Platforma analiz – środowisko aplikacyjne Anaconda pozwalająca na uruchomienie aplikacji: Jupyter, bibliotek języka Python, RStudio, biblioteki języka R z niezbędnymi bibliotekami, ze względu na warsztatowość rozwiązania uruchomione w lokalnej instancji.

Wymienione elementy zostały scharakteryzowane na kolejnych stronach niniejszej rozprawy. Przy czym stos technologiczny rozwiązania tworzą rozwiązania wytworzone z wykorzystaniem języków programowania wysokiego poziomu, co obrazuje rysunek 37.



Rys. 37. Języki wysokiego poziomu  
Źródło: Opracowanie własne

Pierwsza z maszyn, na których prowadzono badania to pięcioosiowe centrum frezarskie MIKRON UCP 800 DURO ze sterowaniem Heidenhain iTNC 530 (Rys. 38).



Rys. 38. Centrum frezarskie MIKRON UCP 800 DURO [135]

Wszystkie osie maszyny są synchroniczne, a stół roboczy maszyny jest uchylny-obrotowy. Specyfikację techniczną centrum frezarskiego przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Specyfikacja techniczna centrum frezarskiego

| Parametr                               | Wartość                                                                                         |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sterowanie CNC                         | Heidenhain iTNC 530                                                                             |
| Wielkość stołu                         | 600 x 600 mm                                                                                    |
| Liczba osi synchronicznych             | 5                                                                                               |
| Liczba narzędzi w magazynie            | 30                                                                                              |
| Obroty wrzeciona                       | 20000 rpm                                                                                       |
| Przesuw w osi X                        | 800 mm                                                                                          |
| Przesuw w osi Y                        | 650 mm                                                                                          |
| Przesuw w osi Z                        | 500 mm                                                                                          |
| Zakres obrotu stołu                    | 360 stopni                                                                                      |
| Rozdzielczość obrotu                   | 0.0001 st                                                                                       |
| Zakres przechyłu                       | +/- 90 st                                                                                       |
| Stożek wrzeciona                       | HSK63A                                                                                          |
| Moc                                    | 24,1 KM                                                                                         |
| Gabaryty maszyny<br>(wys. szer. głęb.) | 295 x 230 cm + plus transporter<br>wiorów 85 cm x 315 cm z rączkami<br>+ 90 cm panel sterowania |
| Waga                                   | 9900 kg                                                                                         |

Źródło: opracowanie własne na podstawie [135]

Druga maszyna tworząca stanowisko badawcze to dwuosiowa tokarka CNC TUR MN 560x2000 ze sterowaniem Siemens 840 D SL (Rys. 39).



Rys. 39. Tokarka CNC TUR MN 560x2000 [136]

Konstrukcja maszyny oparta jest o szerokie monolityczne łożo (433 mm) z dwoma prowadnicami pryzmowymi dla suportu oraz dodatkową pryzmą dla konika. Specyfikację techniczną tokarki przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Specyfikacja techniczna tokarki

| Parametr                                 | Wartość         |
|------------------------------------------|-----------------|
| Sterowanie CNC                           | Sinumerik 810.d |
| Maksymalna długość toczenia              | 815 mm          |
| Przelot wrzeciona                        | 104 mm          |
| Maksymalna średnica toczenia z przelotem | 90 mm           |
| Średnica toczenia nad łóżem              | 560 mm          |
| Średnica toczenia nad suportem           | 300 mm          |
| Uchwyt narzędziowy                       | Sauter          |
| Gniazda narzędziowe                      | 8               |
| Konik ręczny                             |                 |
| Zakres obrotów                           | 2–2500 obr/min. |
| Moc silnika głównego                     | 18,5 kW         |
| Prąd nominalny przyłącza przy 3x400V     | 50A             |
| Uchwyt ręczny                            |                 |
| Waga                                     | 3700 kg         |

Źródło: opracowanie własne na podstawie [137]

Pomiar prowadzony był przy pomocy bezprzewodowego zintegrowanego czujnika o nazwie Texas Instruments Sensor Tag CC2650. SensorTag zawiera 10 sensorów (czujnik światła, mikrofon cyfrowy, czujnik magnetyczny, czujnik wilgotności, czujnik ciśnienia, akcelerometr, żyroskop, magnetometr, czujniki temperatury) zawartych w niewielkiej czerwonej obudowie. Urządzenie zasilane jest baterią CR2032 [138] (Rys. 40).



Rys. 40. Sensor Tag CC2650 [138]

Zintegrowany czujnik oparty jest o mikrokontroler CC2650 z rdzeniem ARM Cortex-M3. Programowanie mikrokontrolera odbywa się przez programator. Wgranie nowego oprogramowania przeprowadzane jest z wykorzystaniem

dedykowanego oprogramowania Sensor Controller Studio. Oprogramowanie zawiera kompilator oraz edytor języka C, który pozwala modyfikować skrypt wykonywany przez czujnik. Czujnik komunikuje się z zewnętrznymi urządzeniami przy pomocy połączenia Bluetooth Low Energy [139].

Na potrzeby badań czujnik został zaadaptowany do pracy w trudnych warunkach obróbki. Dzięki wykorzystaniu taśm jak i opakowań wodoszczelnych, czujnik został zabezpieczony przed wpływem chłodziwa i przed gorącymi wiórami towarzyszącymi procesowi obróbki. W celu ograniczenia ilości i czasu przerw technicznych związanych z wymianą baterii czujnik zmodyfikowano. Modyfikacja polegała na podłączeniu baterii o większej pojemności. Dzięki temu można było zastosować baterie o pojemności 1450 mAh zamiast standardowych 200 mAh. Pozwoliło to na wydłużenie czasu rejestracji na jednej baterii z kilku dni do wymiaru od tygodnia do dwóch. Modyfikacja czujnika przedstawiona została na rysunku 41.



Rys. 41. Modyfikacją zasilania czujnika  
Źródło: Opracowanie własne

W SensorTag zastosowany został układ MPU9250 dostawcy InvenSense [140]. Specyfikację techniczną czujnika przedstawia tabela 5.

Tabela 5. Specyfikacja techniczna Sensor Tag CC2650

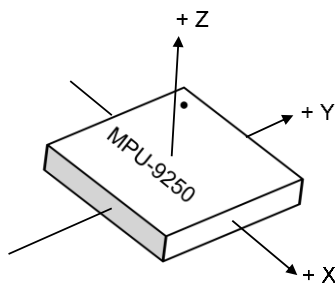
| Parametr                                                                           | Wartość                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Akcelerometr trójosiowy z wyjściem cyfrowym o programowalnym pełnym zakresie skali | $\pm 2 \text{ g}$ , $\pm 4 \text{ g}$ , $\pm 8 \text{ g}$ $\pm 16 \text{ g}$ oraz zintegrowane 16-bitowe przetworniki ADC |
| Normalny prąd roboczy                                                              | 450 $\mu\text{A}$                                                                                                         |
| Prąd trybu akcelerometru o niskiej mocy                                            | 8,4 $\mu\text{A}$ przy 0,98 Hz, 19,8 $\mu\text{A}$ przy 31,25 Hz                                                          |
| Prąd w trybie uśpienia:                                                            | 8 $\mu\text{A}$                                                                                                           |
| Programowalne przerwania                                                           |                                                                                                                           |

Źródło: opracowanie własne na podstawie [139]

Pomimo faktu, że SensorTag dysponuje różnymi czujnikami, a zgodnie z przyjętymi założeniami jak i uwarunkowaniami prowadzenia badań, sensor

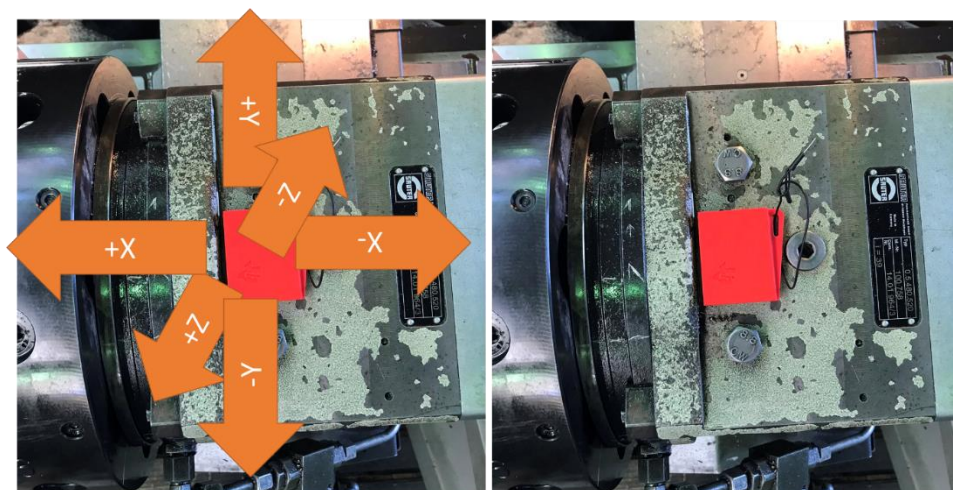
wykorzystano do pomiaru drgań wyrażonych przyspieszeniami. Pomiar przyspieszeń wykonany został za pomocą akcelerometru. Przy czym akcelerometr był układem zużywającym najwięcej energii. Dlatego przy pomocy programatora dokonano zmiany ustawień czujnika i wyłączono pozostałe czujniki. W ten sposób pozostawiono tylko sygnał, który był ważny w perspektywie badań.

Akcelerometr 3-osiowy MPU-9250 wykorzystuje oddzielne masy wzorcowe dla każdej osi. Przyspieszenie wzdłuż określonej osi wywołuje przemieszczenie na odpowiedniej masie próbnej, a czujniki pojemnościowe wykrywają przemieszczenie. Gdy urządzenie zostanie umieszczone na płaskiej powierzchni, będzie mierzyć 0 g na osiach X i Y oraz + 1 g na osi Z. Współczynnik skali akcelerometrów jest kalibrowany w fabryce i jest nominalnie niezależny od napięcia zasilania. Pełny zakres skali wyjścia cyfrowego można ustawić na  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  lub  $\pm 16g$ . Producent deklaruje, że akcelerometr przy typowej pracy zasilanej małą mocą zapewnia pomiary o częstotliwości maksymalnie 500 Hz [140]. Orientację osi akcelerometru prezentuje rysunek 42.

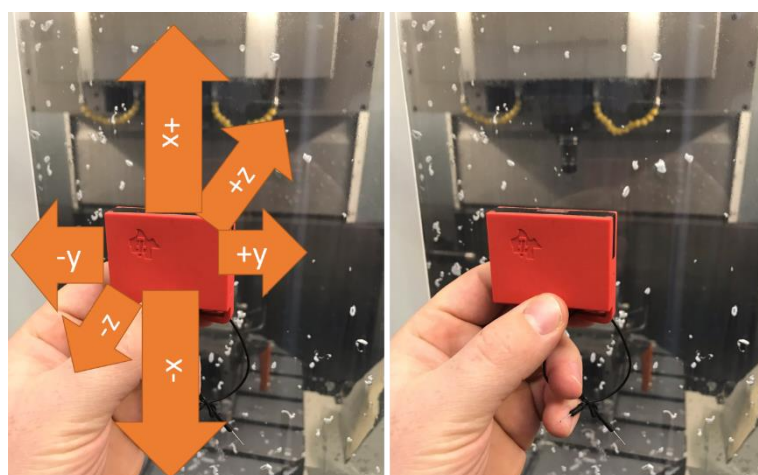


Rys. 42. Orientacja osi akcelerometru [140]

W celu ustalenia miejsca montażu czujnika przeprowadzono analizę mocy sygnału połączenia Bluetooth wokół obu wytypowanych maszyn. Badanie wykazało, że największa moc na poziomie -35 dB RSSI osiągana była od frontальной strony maszyn tj. od strony pracy operatora. Zanotowano, że poziom zakłóceń po bocznych stronach maszyn przekraczał -50 dB RSSI, a z tyłu maszyny osiągał aż -100 dB RSSI – co powodowało zerwanie połączenia przesyłania danych. Ze względu na poziom zakłóceń finalnie zdecydowano się na taki montaż komponentów fizycznych systemu, który pozwolił na przesyłanie danych Bluetooth przy pomocy połączenia o największej mocy – od strony operatora. Następnie przy pomocy magnesu przyklejonego na stałe do obudowy czujnika, przymocowano czujnik. Czujnik umieszczono na korpusie maszyny w niewielkiej odległości od miejsca realizowanej obróbki. W ramach badań doświadczalnych przeprowadzono pomiary drgań bezwzględnych – co zostało zaprezentowane na rysunkach 43 i 44.



Rys. 43. Pozycja czujnika – tokarka  
Źródło: Opracowanie własne



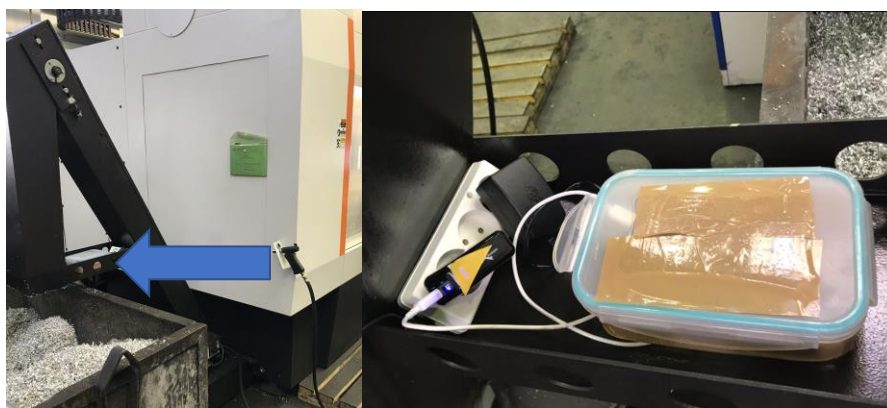
Rys. 44. Pozycja czujnika – centrum frezarskie  
Źródło: Opracowanie własne

Ze względu na uwarunkowanie środowiska obróbki – duża ilość chłodziwa dostarczanego poprzez głowicę narzędzia – czujnik zabezpieczono przed zalaniem jak i przed gorącymi wiórami, co zilustrowane zostało na rysunku 45. Czujniki ze względu na brak wewnętrznego zegara uruchomione zostały w trybie czasowym 24/7.



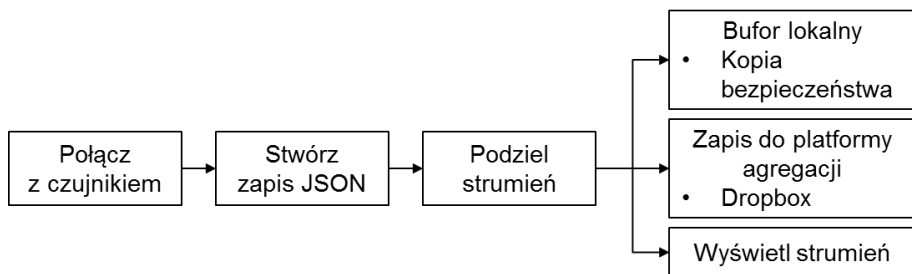
Rys. 45. Zamontowane i zabezpieczone czujniki  
Źródło: Opracowanie własne

Narzędziem agregującym i wstępnie przetwarzającym dane był komputer Raspberry Pi 3 model B+ z Wifi 2.4 i 5GHz z Bluetooth 4.2. Komputer ten nie posiada wysokiej mocy obliczeniowej, ale jest ona wystarczająca do prowadzenia wstępnej obróbki danych (przetwarzanie krawędziowe). Ze względu na trudne warunki na hali produkcyjnej związane z zapyleniem, hałasem czy temperaturą komputer został umieszczony w specjalnym pojemniku, w bezpośrednim sąsiedztwie czujnika, co obrazuje rysunek 46.



Rys. 46. Lokalizacja komputera agregującego dane czujnika dla frezarki  
Źródło: Opracowanie własne

Przechwycone dane były agregowane za pomocą komputera. Po stronie Raspberry Pi uruchomiony został serwer Node-Red odpowiedzialny za uruchomienie odbioru sygnału czujnika i inicjalizację strumienia danych. Realizacja strumienia danych zilustrowana została na rysunku 47. Z wykorzystaniem serwera Node-Red strumień przetwarzany był etapami, w ramach kolejnych węzłów.



Rys. 47. Schemat realizacji strumienia danych za pomocą Node-Red  
Źródło: Opracowanie własne

Pierwszy węzeł „Połącz z czujnikiem” strumienia uruchamiał skrypt Python odpowiedzialny za zestawienie połączenia z czujnikiem danych (o danym adresie MAC Bluetooth) oraz inicjację strumienia danych (Lista 1).

Lista 1. Zestawienie połączenia z czujnikiem

```

sudo python sensortagcollector.py -o -d
54:6C:0E:79:28:82=frezarkaST1
  
```

Źródło: Opracowanie własne

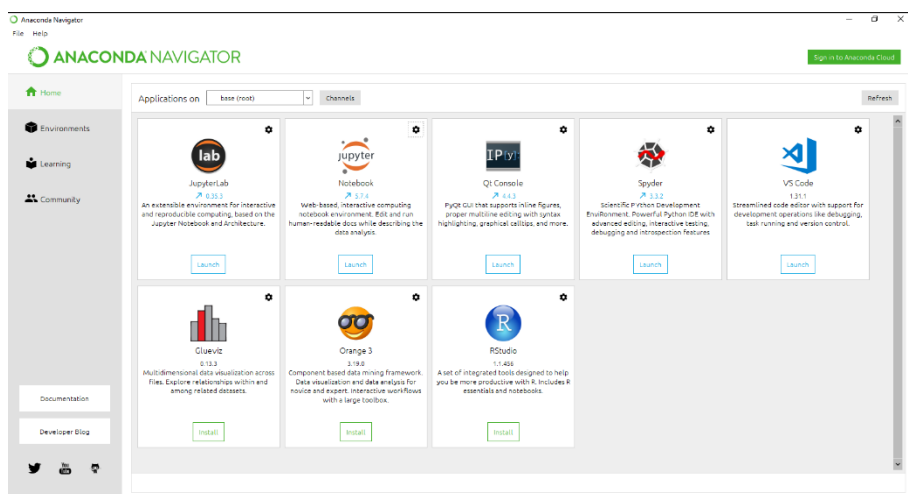
Otrzymywany strumień danych stanowił ciąg wartości. Dlatego zadaniem drugiego węzła w strumieniu był podział strumienia na kolejne odczyty. Kolejny węzeł przetwarzał odczyty do formy tekstowego formatu wymiany danych komputerowych JSON (*ang. javascript object notation*). Zapis zawierał wartości, ale też metadane dotyczące sygnału, takie jak czas powstania sygnału jak i źródło sygnału. Następnie strumień danych przesyłano do platformy pozyskiwania danych. Platforma gromadziła przyrastający dynamicznie wolumen danych. Kopię bezpieczeństwa danych zapisywano też lokalnie. Ze względu na pojemność karty pamięci komputera Raspberry konieczne było okresowe kasowanie danych archiwalnych. Ostatni węzeł pozwalał na bieżące wyświetlanie treści przesyłanego strumienia.

Na tym etapie zgromadzone dane przekierowywane były do platformy analiz realizującej zadanie konwersji i filtracji danych reprezentujących składowe x, y, z przyspieszeń. Przesyłane dane zawierały sporadyczne błędy. Natomiast braki danych były głównie związane z ograniczonym zasilaniem czujnika. Modyfikacja czujnika wskazana na rysunku 41 pozwoliła znacząco ograniczyć występowanie

braków. Komunikacja komputera z zewnętrzną platformą agregacji danych odbywała się dzięki połączeniu bezprzewodowemu Wifi z Routerem LTE, który realizował transmisję do zewnętrznej platformy agregacji danych.

Za platformę spełniającą rolę dynamicznego miejsca agregacji danych obrano usługę udostępnianą przez dostawcę rozwiązań chmury obliczeniowej dropbox.com w modelu platforma jako usługa (*ang. platform as a service, PAAS*). Wybór platformy podyktowany był dużą ilością pluginów i sposobów integracji jakie oferuje. Istotny był też fakt, że usługa agregacji do wybranego poziomu danych udostępniana jest nieodpłatnie.

Ostatnim narzędziem wykorzystanym w ramach stanowiska badawczego była platforma analiz wytworzona z wykorzystaniem środowiska aplikacyjnego Anaconda (Rys. 48). Środowisko Anaconda stanowi dystrybucję open source aplikacji bibliotek języków Python i R dedykowaną do obliczeń naukowych (nauki o danych, aplikacje do uczenia maszynowego, przetwarzanie danych na dużą skalę, analizy predykcyjne itp.). Z poziomu środowiska Anaconda uruchomiane zostały takie aplikacje jak notatnik Jupyter i RStudio.



Rys. 48. Ekran startowy pakietu Anaconda

Źródło: Opracowanie własne

Notatnik Jupyter [141] to aplikacja dostępna przez przeglądarkę internetową, która umożliwia tworzenie i udostępnianie dokumentów zawierających wykonywalny kod, równania, wizualizacje i tekst komentarzy. Jupyter może działać jako osobna usługa albo być uruchamiany z poziomu Anacondy. Rozwiązanie to może być wykorzystane do czyszczenia i transformacji danych, symulacji numerycznej, modelowania statystycznego, wizualizacji danych, uczenia maszynowego i wielu innych [141]. Natomiast RStudio to zintegrowane środowisko programistyczne (*ang. integrated development enviroment, IDE*) dla

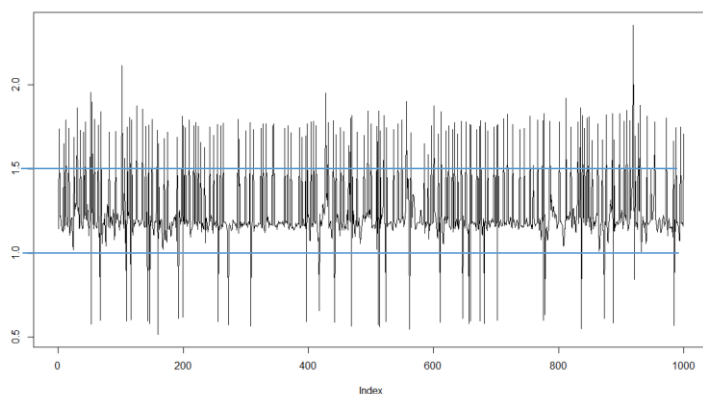
języka R zawierające konsolę, edytor podświetlania składni, który obsługuje bezpośrednio wykonywanie kodu, a także narzędzia do debugowania i zarządzania obszarem roboczym [142]. RStudio pozwala wykonywać skrypty napisane w języku R. Jest to język stosowany do obliczeń, który zapewnia szeroką gamę technik statystycznych i graficznych: modelowanie liniowe i nieliniowe, testy statystyczne, analiza szeregów czasowych, klasyfikacja czy grupowanie [143]. W środowisku aplikacyjnym Anacondy uruchamiany jest pakiet Pandas i NumPy. Pandas to biblioteka open source, zapewniająca wydajne, łatwe w użyciu struktury danych i narzędzia do analizy danych dla języka programowania Python [144]. Z kolei NumPy [145] to podstawowy pakiet do obliczeń naukowych z językiem Python. Natomiast w środowisku RStudio uruchamiane są standardowe pakiety obsługi danych oraz jeden pakiet specjalistyczny o nazwie tsmc 0.3.4 [8]. Pakiet tsmc to specjalistyczny pakiet generujący i przetwarzający profil macierzy [114].

Stanowisko badawcze w trakcie badań było przedmiotem ciągłego monitorowania ze strony autora jak i pracowników przedsiębiorstwa.

### 3.3.2. Zarejestrowany sygnał

W rozprawie metoda analizy strumienia danych obrazującego realizację procesu technologicznego z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych dostarcza informacji na temat statusu maszyny. Analiza bazuje na strumieniu danych w formie szeregu czasowego, który stanowi zarejestrowany proces technologiczny obróbki (w wyniku badań doświadczalnych na produkcji).

W drodze analizy i obserwacji ustalono, że szereg ten charakteryzują trzy zasadnicze stany (Rys. 49).



Rys. 49. Zarejestrowany przykładowy szereg czasowy

Źródło: Opracowanie własne

Stany te charakteryzowane są adekwatnie do wartości skutecznej odchyień. Niska wartość odchyień w przedziale od 0,5 do 1 stanowi zatrzymanie procesu

związane albo z obrotem stołu, albo ze zmianą narzędzia. Średnia wartość przyspieszeń w przedziale od 1 do 1,5 stanowi realizację zabiegu. Natomiast już wychylenia w zakresie powyżej 1,5 należy sklasyfikować jako ruch związany z przebrojeniem bądź zmianą pozycji.

Przedmiot badań stanowił zapis drgań związanych z pracą maszyn wykonujących proces technologiczny w warunkach przemysłowych w ramach wydziału obróbki skrawaniem. Zgodnie ze strategią badań i możliwościami stanowiska badawczego pomiar drgań realizowany był bezpośrednio dla procesu technologicznego części obrabianej na tokarce oraz na frezarce. Natomiast drgania związane z działaniem urządzenia (napęd, przekładnie, zasilanie) nie były rejestrowane. W związku z tym zarejestrowane dane stanowią wierne odwzorowanie realnych procesów wytwarzania w warunkach produkcji przemysłowej. Zarejestrowane dane przekazane były do systemu analizującego i przetwarzającego dane. W wyniku badań powstał katalog plików wraz z opisem dla poszczególnych dni przeprowadzonych badań.

Realizacja procesu technologicznego dla części na frezarce trwała średnio według wskazanego orientacyjnego normatywu od około sześciu i pół minuty do siedmiu minut. Natomiast proces technologiczny dla obróbki realizowanej na tokarce według wskazanego orientacyjnego normatywu trwa 10 minut.

Zastosowany system pozyskiwania danych pozwolił na zebranie danych rzeczywistych w postaci 29 plików danych. Na potrzeby badań pliki te opisane zostały jako próbki, którym nadano kolejne numery.

Badania doświadczalne w środowisku produkcyjnym prowadzone były przez trzy miesiące. Badania w żaden sposób nie zakłócały procesu produkcji w przedsiębiorstwie. Możliwości rejestrowania były ściśle uzależnione od tego, jaka produkcja była realizowana przez przedsiębiorstwo.

### **3.3.3. Wstępne przetwarzanie danych**

Zgodnie z metodyką CRISP-DM (rozdział 2.4) kluczowym zadaniem w przygotowaniu danych jest ich zrozumienie. W badaniu gromadzone były szeregi czasowe przyspieszeń. Zgodnie z literaturą [70] szeregi czasowe to szczególny typ danych odnoszących się do kolejnych jednostek czasu. Szereg czasowy to funkcja określona na kolejnych momentach. Z formalnego punktu widzenia jest on realizacją procesu stochastycznego, dla którego dziedziną jest czas. Z drugiej strony szeregi czasowe są podstawą analizy dynamiki zjawisk. Analiza szeregów czasowych pozwala na odkrywanie wiedzy na temat sposobu zmiany wartości danych. Niemniej jednak, by analizować szeregi czasowe, konieczne jest spełnienie szeregu założeń. Zebrane dane powinny być pozyskiwane w równych odstępach czasu (szereg okresów). Próbką danych powinna stanowić znaczna ilość, tak by osiągnąć statystycznie istotne wyniki. Dane nie powinny zawierać braków, błędów oraz powinny posiadać odpowiedni typ.

W celu spełnienia powyższych założeń wykonano czyszczenie zebranych danych, a następnie analizę eksploracyjną szeregów. W wyselekcjonowaniu sygnału wykorzystano biblioteki Pandas i Numpy języka Python dedykowane obróbce i przetwarzaniu danych. Zastosowanie takich rozwiązań pozwala na poprawę czytelności istotnych dla identyfikacji symptomów pracy maszyny technologicznej [92].

- Czyszczenie danych

Celem operacji czyszczenia było przygotowanie danych pod względem planowanych badań – opracowania algorytmów dynamicznych przetwarzających dane przyspieszeń. Zebrane dane stanowią zarówno dane przyspieszeń, jak i inne metadane – związane z procesem akwizycji. W celu przeprowadzenia analiz konieczne jest wyodrębnienie i przygotowanie tylko tych danych, które wnoszą wartość dodaną dla analizy.

Zebrane dane przyspieszeń stanowią przyspieszenia zarejestrowane w osiach x, y, z przez akcelerometr. W literaturze [6], [27], [82] wartością typowo obrazującą zakres zmian przyspieszeń jest wartość skuteczna przyspieszenia drgań (*ang. root mean square, RMS*). RMS dobrano jako wartość, która sumarycznie obrazuje wartość przyspieszenia rejestrowaną przez czujnik. Dobór jest adekwatny do możliwości i częstotliwości rejestracji danych. Dlatego RMS przyjęto jako miarę do analizy zebranych danych. Wartość skuteczną według normy PN-82/N-01350 wskazana jest jako pierwiastek kwadratowy ze średniej arytmetycznej kwadratów wartości przyspieszenia (zmierzonych wartości dyskretnych) w określonym przedziale czasu. Dla  $n$  dyskretnych wartości pomiarów przyspieszeń  $a_i$ , wartość skuteczna wyrażana jest wzorem:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (18)$$

gdzie:  $a_i$  –  $i$ -te przyspieszenie.

Źródłem drgań są procesy skrawania podczas bezpośredniego kontaktu ostrza narzędzia z obrabianą częścią. Wykres interwału w jednostkach  $g$  ma charakter oscylacyjny w danych jednostkach przyspieszenia. Wynika to z okresowej współpracy narzędzia z przedmiotem obrabianym. Ta reprezentacja danych jest przydatna do identyfikowania zmian w pracy maszyny [96]. W związku z tym na potrzeby niniejszej pracy badane będzie RMS zgodnie z poniższym wzorem:

$$RMS_{badane} = \sqrt{\frac{1}{n} (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)} \quad (19)$$

gdzie:  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  – przyspieszenia w osiach x, y, z.

Zadaniem przetwarzania danych nie jest wnikliwa analiza charakteru drgań, a stosowanie ich jako wskaźnika zmiany statusu maszyny. Celem czyszczenia i przygotowania danych jest wyodrębnienie z nich wartości skutecznej przyspieszenia.

W ramach czyszczenia danych zrealizowano szereg operacji dla każdej z próbek. Pierwszy krok czyszczenia danych polegał na załadowaniu odpowiednich bibliotek Python, takich jak: Pandas, Numpy, Matplotlib oraz Datetime. Następnie wykonano selekcję rekordów oraz usunięto nadmiarowe kolumny i braki danych. W kolejnym kroku wydzielono serie danych przyspieszeń, po czym obliczono wartość skuteczną RMS dla każdego rekordu. W związku z ograniczeniem wydajnościowym stosu Bluetooth jak i występującymi zakłóceniami rejestrowano zapisy, dla różnych próbek, z częstotliwością 20–100 Hz. Ze względu na ten fakt i zgodnie z przyjętymi założeniami przetwarzania szeregów czasowych konieczne było zsumowanie wartości do wymiaru jednosekundowych interwałów.

Tak przetworzone dane zostały zapisane do plików, które opisano jako kolejne próbki. Pozyskanie danych w formie plików było niezbędne do przeprowadzenia dalszych badań na platformie analiz z wykorzystaniem bibliotek programistycznych i języka R. Całość skryptu prezentującego czyszczenie danych zawarta została w Załącznik nr 1.

Podsumowując, w wyniku czyszczenia ilość próbek zmalała z pierwotnych 29 do badanych 18. Powodem zmniejszenia liczby próbek były braki ciągłości danych i błędy wynikające zarówno z rozwojowego charakteru rozwiązania jak i uwarunkowań badań. W celu zachowania spójności katalogu próbek zachowano ich pierwotne nazwy. Sumarycznie zakres zarejestrowanych danych przedstawia tabela 6.

Tabela 6. Zarejestrowane dane – podsumowanie

| Maszyna  | [sekund] | [godzin] | [zmian roboczych] |
|----------|----------|----------|-------------------|
| Frezarka | 1677071  | 465,85   | 58,23             |
| Tokarka  | 1017751  | 282,71   | 35,34             |

Źródło: Opracowanie własne

Natomiast tabela 7 szczegółowo wskazuje zakres zarejestrowanych danych dla frezarki, a tabela 8 dla tokarki.

Tabela 7. Zarejestrowane dane – frezarka

| Nazwa próbki | [sekund] | [godzin] | [zmian roboczych] |
|--------------|----------|----------|-------------------|
| Próbka 2     | 107659   | 29,91    | 3,74              |
| Próbka 5     | 169783   | 47,16    | 5,90              |
| Próbka 9     | 329828   | 91,62    | 11,45             |
| Próbka 11    | 167985   | 46,66    | 5,83              |
| Próbka 15    | 141628   | 39,34    | 4,92              |
| Próbka 19    | 15839    | 4,40     | 0,55              |
| Próbka 20    | 235942   | 65,54    | 8,19              |
| Próbka 22    | 178735   | 49,65    | 6,21              |
| Próbka 25    | 329171   | 91,44    | 11,43             |

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 8. Zarejestrowane dane – tokarka

| Nazwa próbki | [sekund] | [godzin] | [zmian roboczych] |
|--------------|----------|----------|-------------------|
| Próbka 7     | 86929    | 24,15    | 3,02              |
| Próbka 8     | 53037    | 14,73    | 1,84              |
| Próbka 10    | 149763   | 41,60    | 5,20              |
| Próbka 13    | 153910   | 42,75    | 5,34              |
| Próbka 17    | 149763   | 41,60    | 5,20              |
| Próbka 18    | 193709   | 53,81    | 6,73              |
| Próbka 21    | 28849    | 8,01     | 1,00              |
| Próbka 27    | 151176   | 41,99    | 5,25              |

Źródło: Opracowanie własne

- Analiza eksploracyjna

W celu scharakteryzowania zebranych danych przeprowadzona została analiza eksploracyjna danych. Ze względu na fakt, że dane mają formę szeregów czasowych konieczne było zastosowanie odpowiedniej teorii i metod analizy danych. W pierwszym kroku użyto tradycyjnej analizy szeregów czasowych. Do jej przeprowadzenia wykorzystano bibliotekę języka R o nazwie tsmc. W pierwszym kroku wybrano próbkę danych. Celem przybliżenia wykonanych prac poniżej opisano przebieg analizowanej próbki danych nr 15 zarejestrowanych na frezarce.

Załadowana próbka zawiera 141 628 rekordów prezentujących wartość RMS, co stanowi 141 628 sekund, a tym samym ponad 39 godzin zarejestrowanego sygnału. Sekundy w analizowanym sygnale stanowią indeks strumienia, wobec którego realizowana była analiza. Największa wartość RMS próbki stanowi

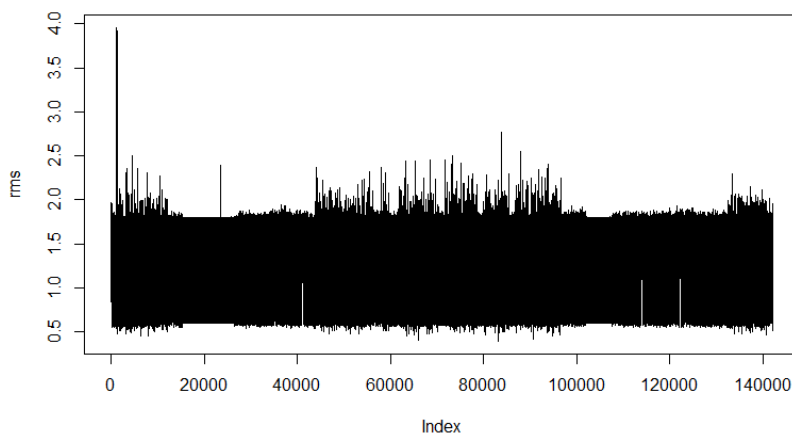
3,9575, natomiast najmniejsza 0,3952, wartość średnią wynosi 1,2630, a wartość mediany to 1,1923. Powyższa statystyka została wygenerowana przy pomocy polecenia `summary` dla wektora RMS próbki.

Lista 2. Charakterystyka próbki nr 15

```
> summary(ramka_danych$rms)
Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
0.3952 1.1628 1.1923 1.2630 1.2229 3.9575
```

Źródło: Opracowanie własne

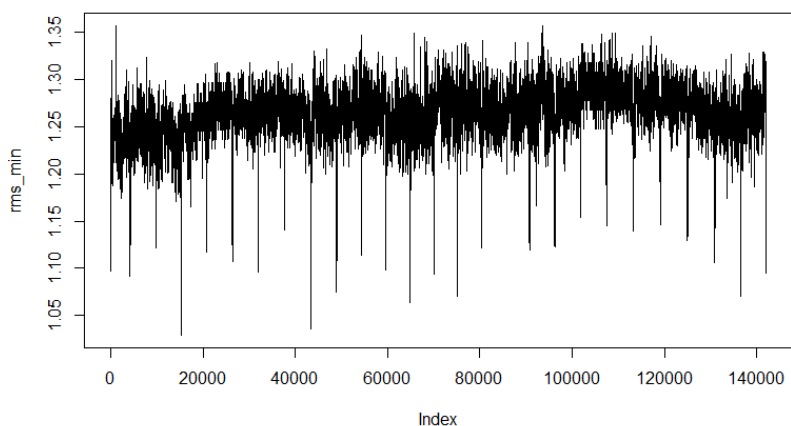
Następnie przy pomocy polecenia `plot(rms, type="l")`, wygenerowano wykres wartości RMS, przedstawiony na rysunku 50.



Rys. 50. Wykres wartości RMS

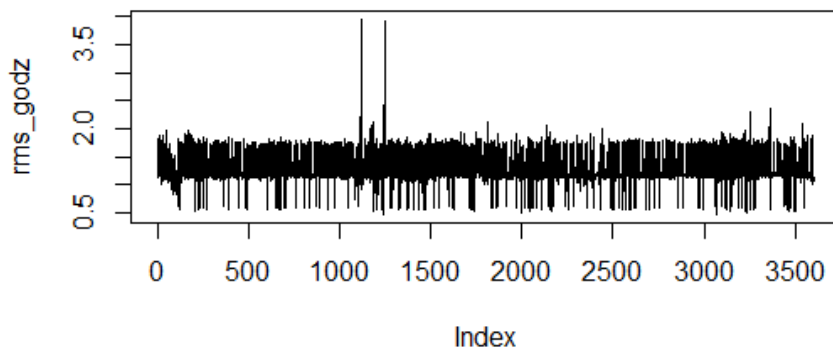
Źródło: Opracowanie własne

Ze względu na zaobserwowany duży szum, próbkę wygładzono przy pomocy minutowej średniej kroczącej. Pokazało to charakterystykę szeregu. Jak przedstawiono na rysunku 51, zmienność szeregu jest stosunkowo stała w czasie.



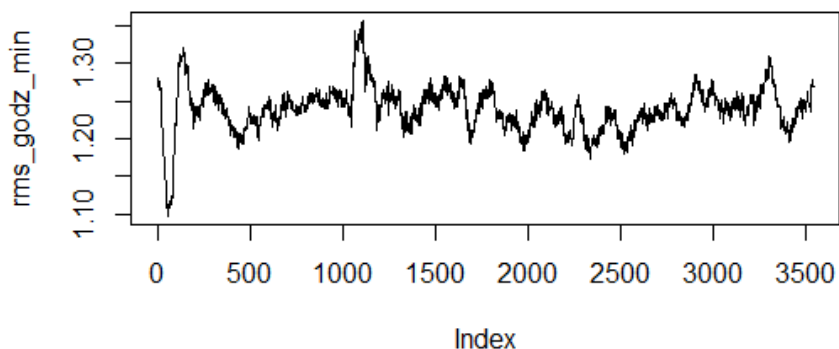
Rys. 51. Wykres RMS po zastosowaniu minutowej średniej kroczącej  
Źródło: Opracowanie własne

W związku z powyższym do dalszych analiz przyjęto model addytywny. W celu analizy próbka została zawężona do pierwszej godziny zarejestrowanego sygnału (Rys. 52).



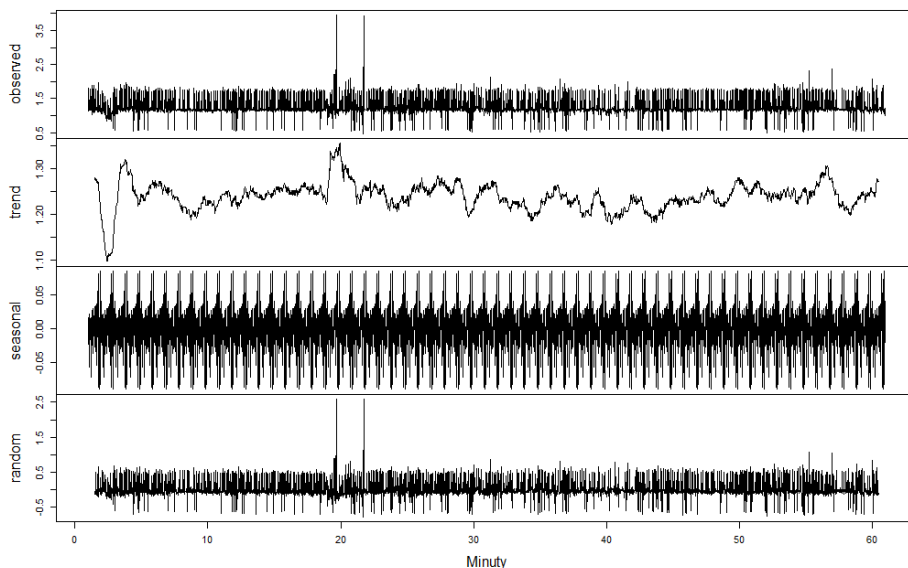
Rys. 52. Wykres RMS – godzinny  
Źródło: Opracowanie własne

Po wykonaniu takich samych operacji dla całej próbki i średniej kroczącej o wymiarze minuty, potwierdza się fakt stałej zmienności, plus widoczna jest znacząca sezonowość, co ilustruje rysunek 53.

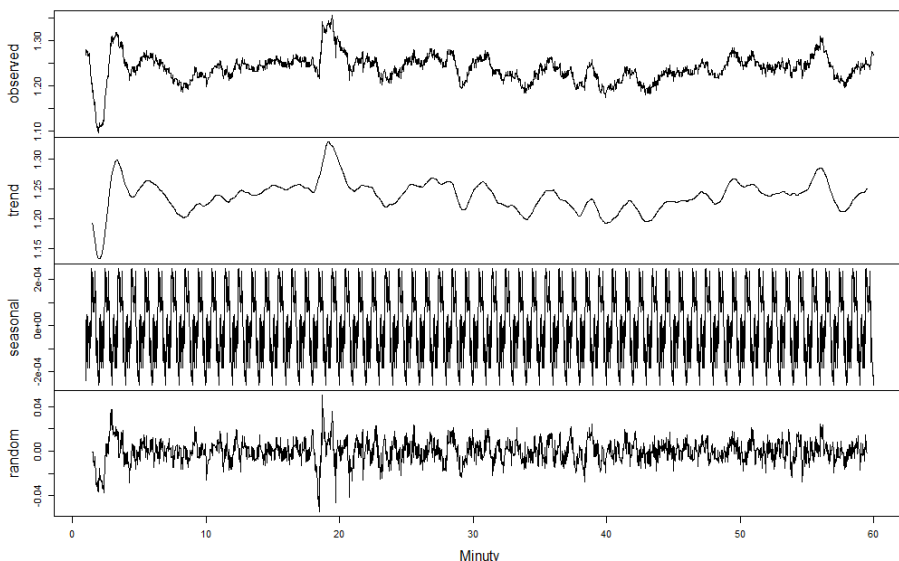


Rys. 53. Wykres RMS – godzinny po zastosowaniu minutowej średniej kroczącej  
Źródło: Opracowanie własne

Następnie przy pomocy polecenia `decompose` z biblioteki języka R o nazwie `timeSeries` przeprowadzono dekompozycję szeregu czasowego zarówno dla próbki surowych danych jak i wygładzonych. Po dekompozycji pakiet wygenerował podsumowanie (Rys. 54 i 55) przedstawiające wykres zawierający dane zaobserwowane (*ang. observed*), wykres trendu (*ang. trend*), wykres sezonowości (*ang. seasonal*) oraz wykres szumu (*ang. random*) w odniesieniu do czasu wyrażonego w minutach.

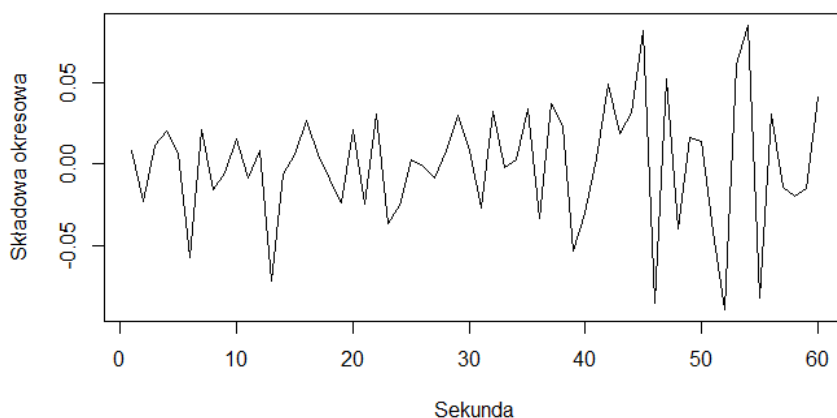


Rys. 54. Dekompozycja RMS  
Źródło: Opracowanie własne



Rys. 55. Dekompozycja RMS dla próbki po zastosowaniu minutowej średniej kroczącej  
Źródło: Opracowanie własne

Przeprowadzona dekompozycja pozwoliła na wskazanie składowej okresowej, która prezentowana jest na rysunku 56.



Rys. 56. Składowa okresowa dla RMS  
Źródło: Opracowanie własne

Przeprowadzone przekształcenia pozwoliły na zidentyfikowanie struktury szeregu. Na rysunkach 54 i 55 można zaobserwować, że trend w ramach próbki ma charakter nieliniowy i oscyluje wokół stałej wartości wychyleń. Zauważalne są powtarzalne motywy, ale trudno je jednoznacznie wskazać. Dekompozycja

pozwoiliła także na wyodrębnienie składnika okresowości dla niewyglądzonych danych, co ilustruje rysunek 56.

Przeprowadzona analiza przy modelowaniu addytywnym wykazała, że zarejestrowany sygnał jest dynamiczny i nie wykazuje dominującego trendu. Wykazanie wskazanego faktu było dopiero możliwe po wygładzeniu i eliminacji szumu. Tożsame charakterystyki były uzyskiwane dla pozostałych zgromadzonych próbek. Zatem przedstawiona metoda pozwala przyjrzeć się danym szeregów, ale nie jest adekwatna do zadania analizy dużego maszynowego wolumenu danych, które pozyskano w ramach badań doświadczalnych.

W związku z tym, konieczne było zaproponowanie innego podejścia i zastosowanie bardziej wydajnej metody. Taką metodą jest generowanie profilu macierzowego szczegółowo opisanego w rozdziale 2.4. Do kluczowych zalet profilu należy to, że jest on odporny na szum. Wynika to z faktu, że w profilu porównana jest sekwencja szeregu z całym szeregiem i budowany jest profil odległościowy na bazie znormalizowanej odległości euklidesowej [114]. Szum zawarty w sekwencji znajdzie swoje odwzorowanie w wyszukanych motywach. W celu weryfikacji działania profilu na zebranych danych doświadczalnych wygenerowano profil macierzy dla analizowanej próbki nr 15.

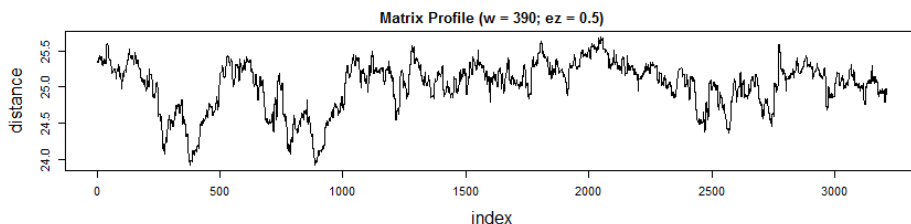
Przyjęto, że podobnie jak w przypadku analizy dekompozycji, przeanalizowana zostanie godzinny zakres zarejestrowanej próby. Zgodnie ze wskazanym normatywem obróbki frezarką trwa sześć i pół minuty zatem algorytm generowania profilu odległości macierzy poszukiwał wzorców takiej długości. Do generowania zastosowano domyślny najszybszy algorytm STOMP. Co więcej, wykorzystano cztery rdzenie procesora oraz skrypt wyświetlał status realizacji obliczeń – co prezentuje lista 3.

Lista 3. Generowanie profilu

```
#Generowanie profilu
mp<-tsmp(rms_godz, window_size = 390, n_workers = 4, verbose
= 1)
#Generowanie wykresu profilu
plot(mp)
```

Źródło: Opracowanie własne

Wynik w postaci profilu otrzymano w czasie 1,41 sekundy. Uzyskany profil macierzy został zobrazowany na rysunku 57. Wygenerowany profil macierzy odległości (*ang. distance*) charakteryzuje się dużą dynamiką. Duża ilość stosunkowo niskich wartości oznacza, że sygnał zawiera powtarzające się wzorce. Wzorce zostały zidentyfikowane w odniesieniu do założonego okna sekwencji. To oznacza, że zidentyfikowano realizowane procesy technologiczne dla obróbki części. Zatem pojawia się podstawa by twierdzić, że w próbie zidentyfikowane zostały wzorce procesów technologicznych wskazujących status realizacji obróbki.



Rys. 57. Profil macierzy próbki szeregu czasowego  
Źródło: Opracowanie własne

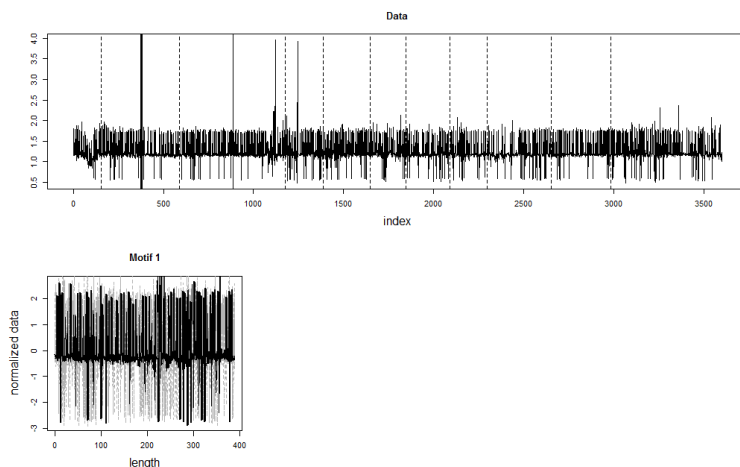
W związku z powyższym przeanalizowano wygenerowany profil macierzowy pod względem identyfikacji wzorców. Posłużyła temu specjalna komenda pakietu tsmpp, co przedstawia lista 4.

#### Lista 4. Identyfikacja wzorców

```
#Identyfikacja wzorców
mp_wzorzec<-find_motif(mp, n_motifs = 1)
#Generowanie wykresu wzorców
plot(mp_wzorzec)
```

Źródło: Opracowanie własne

Zidentyfikowany wzorec ilustruje rysunek 58. Wzorec stanowi motyw (*ang. motif*) powtarzający się w danych o danej długości (*ang. length*) dla danych znormalizowanych (*ang. normalized data*).



Rys. 58. Zidentyfikowany wzorec  
Źródło: Opracowanie własne

Każdy wzorec identyfikowany jest przez indeks wskazujący rozpoczęcie identyfikacji danego wzorca. Wyodrębnionemu wzorcowi towarzyszą podobne,

to znaczy te najbardziej zbliżone. Indeksy zidentyfikowanego wzorca jak i mu podobnych znajdują się w wygenerowanej strukturze profilu macierzy odległości wzorców i zaprezentowane zostały na lista 5.

Lista 5. Indeksy zidentyfikowanych wzorców

```
> mp_wzorrec$motif$motif_idx
[[1]]
[1] 379 888
> mp_wzorrec$motif$motif_neighbor
[[1]]
[1] 2653 1176 2295 1847 2091 155 2983 1388 1648 587
```

Źródło: Opracowanie własne

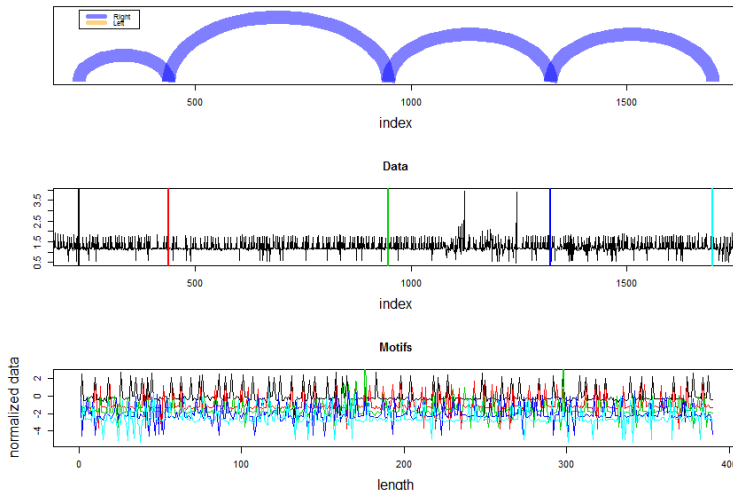
Kolejną kwestią, do której wykorzystano profil macierzowy było sprawdzenie czy w próbce pojawiają się łańcuchy wzorców (Lista 6).

Lista 6. Identyfikacja łańcuchów wzorców

```
#Identyfikacja łańcuchów
mp_lan<-find_chains(mp)
#Generowanie wykresu łańcuchów
plot(mp_lan)
```

Źródło: Opracowanie własne

Łańcuch wzorców przedstawia zbliżone wzorce, które następują kolejno po sobie. Rysunek 59 pokazuje dla jakich indeksów zidentyfikowany został łańcuch wzorców.



Rys. 59. Zidentyfikowany łańcuch wzorców

Źródło: Opracowanie własne

W analizowanym przypadku wektor ten stanowi serie pięciu wystąpień, co wskazuje lista 7. Kotwicę łańcucha stanowi wzorzec o indeksie 231.

Lista 7. Indeks zidentyfikowanego łańcucha motywów

```
#Wyświetlenie najlepszego łańcucha
mp_lan$chain$best
> mp_lan$chain$best
[1] 231 439 948 1324 1699
```

Źródło: Opracowanie własne

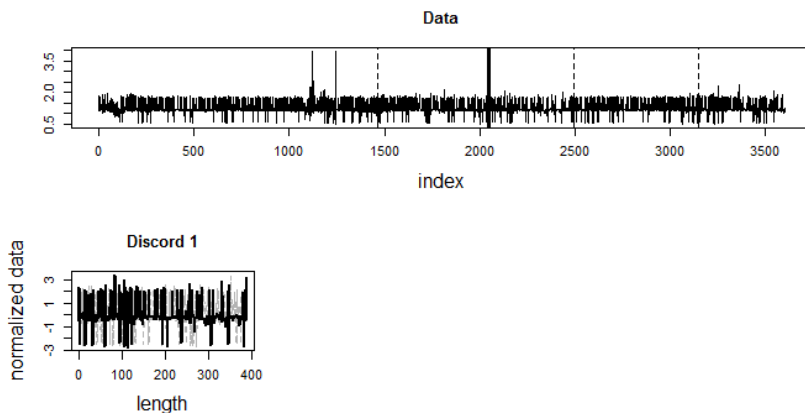
W ostatnim kroku sprawdzono profil macierzowy pod względem występowania zaburzeń, co wskazuje lista 8.

Lista 8. Identyfikacja zaburzeń

```
#Identyfikacja zaburzeń
mp_anomalia<-find_discord(mp)
#Generowanie wykresu zaburzeń
plot(mp_zaburzenie)
```

Źródło: Opracowanie własne

W ramach próbki wyszczególniono najsilniej pojawiającą się zaburzenie, co można zaobserwować na rysunku 60.



Rys. 60. Zidentyfikowane zaburzenie

Źródło: Opracowanie własne

Analiza (Lista 9) wskazuje indeks wystąpienia najsilniejszego zaburzenia oraz zaburzenia jemu towarzyszące. Jej wynik pokazuje, że najsilniejsze zaburzenie wystąpiło w połowie analizowanego szeregu czasowego próbki. Zaburzenie wystąpiło dla sekwencji rozpoczynającej się od pozycji 2048. Przy czym

zaburzenia najbardziej mu podobne wystąpiły od indeksu kolejno 1465, 3149 oraz 2494.

Lista 9. Indeksy zidentyfikowanych zaburzeń

```
> mp_anomalia$discord$discord_idx  
[1] 2048  
> mp_anomalia$discord$discord_neighbor  
[[1]]  
[1] 1465 3149 2494
```

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, obliczony profil macierzowy pozwala uzyskać więcej informacji od tradycyjnej dekompozycji szeregu czasowego. Zatem obliczenie profilu pozwala szybko zidentyfikować przydatne informacje – w perspektywie jego analizy. W związku z tym z całą pewnością może zostać wykorzystany w dynamicznej analizie napływających strumieniowo danych.

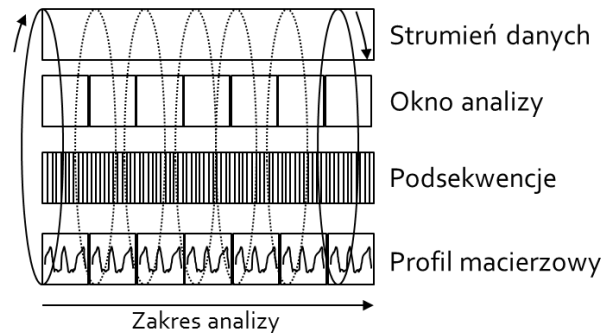
### 3.3.4. Opracowane algorytmy dynamiczne

Opracowanie algorytmów dynamicznych w ramach niniejszej pracy posłuży do określenia statusu maszyny produkcyjnej na podstawie analizy dyskretnego sygnału obrazującego realizację procesu technologicznego obróbki części. Dlatego zgodnie ze zdefiniowanym celem pracy, тезami jak i uwarunkowaniami badań do dynamicznej analizy pozyskanych danych wykorzystany zostanie profil macierzowy i generujące go algorytmy. Zastosowanie profilu pozwoli na sformułowanie algorytmów dynamicznych analizy zarówno w kontekście harmonogramu jak i utrzymania ruchu.

Wykorzystanie profilu macierzowego wymaga dostosowania go do specyfiki strumienia. Jako że wzorce, łańcuchy wzorców i zaburzenia wykazywane są względem odległości poszczególnych podsekwencji w danym zakresie analizy, dlatego konieczne jest wyznaczenie takiego okna analizowanego strumienia, które pozwoli na uwzględnienie istotnych w danym przedziale czasowym wartości odległości. Najmniejsza wartość odległości dla całej próbki danych nie musi być tożsama z tą, która wystąpiła w jej wybranym przedziale. Dobór okna definiowany jest przez domenę produkcji (organizacja zmian roboczych, wielkość partii produkcyjnych) oraz zakres analizowanego strumienia danych. Dane analizowane są przez algorytm dynamiczny w perspektywie wybranego okna analizy. Dla zdefiniowanych parametrów analizy algorytm dynamiczny działa w pętli (Rys. 61).

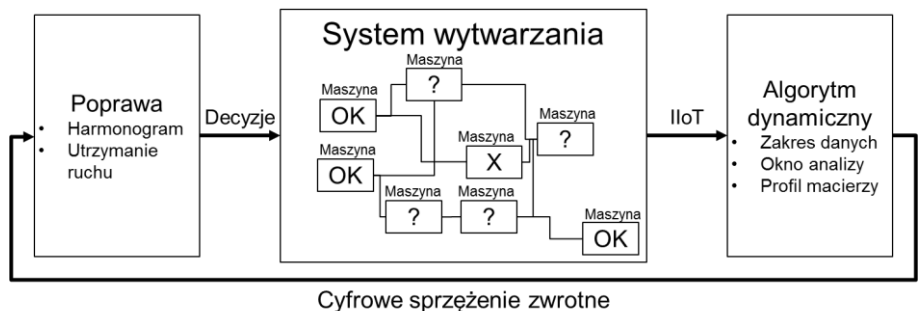
Pętla jest realizowana do czasu, gdy pozostają dane zakresu dla wykonania okna analizy. Okna analizy mogą być definiowane jako kolejne przedziały bądź jako przedział kroczący (na przykład jako krok określony na poziomie połowy okna). Analiza realizowana jest w odniesieniu do normatywu czasu procesu

technologicznego. Odnosnie do niego realizowane jest rozpoznawanie wzorców, łańcuchów wzorców jak i zaburzeń, które później interpretowane są jako czas realizacji procesu technologicznego obróbki, bądź czas wystąpienia zaburzenia procesu technologicznego.



Rys. 61. Przetwarzania danych przez algorytm dynamiczny  
Źródło: Opracowanie własne

Wyniki te w zależności od przyjętej częstotliwości i zakresu analiz jako informacje cyfrowego sprzężenia zwrotnego trafiają na poziom planowania taktycznego przedsiębiorstwa, gdzie poprawa efektywności realizowana jest za pomocą decyzji zarządczych zmian w kontekście harmonogramu jak i utrzymania ruchu (Rys. 62). Podejmowane decyzje zarządcze dotyczą proponowania planowania zdolności produkcyjnych, jak i usprawnień czy kontroli.



Rys. 62. Realizacja cyfrowego sprzężenia zwrotnego  
Źródło: Opracowanie własne

Wywoływanie algorytmów może mieć charakter okresowy, zadaniowy czy zdarzeniowy. W przypadku okresowego wywołania możliwe jest obserwowanie zmian wyników działania algorytmu w czasie. Natomiast przy zadaniowym wywołaniu, algorytm analizuje dane w perspektywie wybranego okna zakresu analizy strumienia – określanego w momencie przeprowadzania analizy.

Natomiast zdarzeniowy polega na tym, że algorytm wywoływany na podstawie reguły, która na bieżąco śledzi dane, a przy przekroczeniu wybranego poziomu wywołuje algorytm.

Ze względu na zastosowanie narzędzi IIoT obliczenia algorytmów mogą być realizowane w czasie rzeczywistym, praktycznie wraz z pojawieniem się nowych danych. Narzędzia te zapewniają stały dostęp do danych rzeczywistych procesów technologicznych. Ostatecznie, to od decyzji kadry zarządzającej, charakteru i typu produkcji zależy jaki przyjęty zostanie cykl wywołania algorytmów.

Ze względu na dynamiczną charakterystykę przetwarzanych danych, opracowane algorytmy jako wynik wykazują tendencję centralną w formie średniej i mediany. Przy czym obliczenie tych wartości wiąże się z ryzykiem otrzymania niemiernodajnych wyników, szczególnie w przypadku występowania wielu punktów odstających. Za takie punkty uznano i usunięto, w drodze obliczeń, wartości wykraczające poza 1,5-krotnością przedziału międzykwartylowego powyżej górnego kwartyla i poniżej dolnego kwartyla.

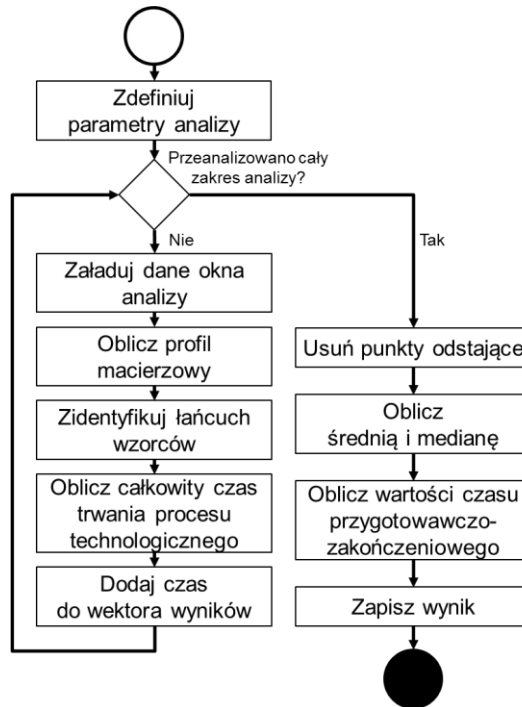
Algorytmy dynamiczne zaimplementowano przy pomocy języka R zgodnie z określonym schematem dla każdego algorytmu. Do implementacji algorytmów obliczeń profilu macierzowego użyto bibliotekę języka R o nazwie `tsmp`. Okno analizy zaimplementowane zostało przy pomocy pętli dla każdego (*ang. for loop*). Szczegóły implementacji algorytmów obu kategorii przedstawiono w Załącznik nr 2.

### **3.3.4.1. Algorytmy dynamiczne w kontekście harmonogramu**

W kontekście harmonogramu sformułowano dwa algorytmy dynamiczne. Pierwszy z nich dotyczy wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części. Natomiast drugi opracowany algorytm dotyczy wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny. Poniżej kolejno zaprezentowano zarówno schemat opracowanych algorytmów jak i ich specyfikację.

- Algorytm dynamiczny wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części

Algorytm dynamiczny składa się z dziesięciu kroków z czego pięć realizowana jest w pętli odpowiedniej do ilości danych będących zakresem analizy. Schemat algorytmu zilustrowany został na rysunku 63, natomiast specyfikację algorytmu prezentuje tabela 9.



Rys. 63. Algorytm dynamiczny wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części  
Źródło: Opracowanie własne

Szczegółowa specyfikacja działania algorytmu zawarta została w tabeli 9.

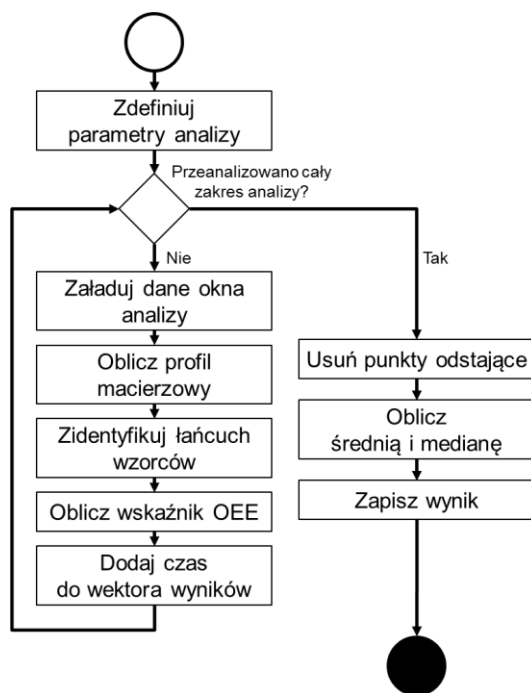
Tabela 9. Specyfikacja algorytmu dynamicznego wyznaczania całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nazwa:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Algorytm dynamiczny wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części             |
| <b>Wejście:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Zakres analizy – strumień danych<br>Okno analizy<br>Normatyw czasu procesu technologicznego dla obróbki części          |
| <b>Wyjście:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Rzeczywisty całkowity czas procesu technologicznego dla obróbki części<br>Rzeczywisty czas przygotowawczo-zakończeniowy |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adekwatnie do długości strumienia <b>oblicz</b> liczbę <math>n</math> okien analizy;</li> <li>2. Sprawdź czy przeanalizowano całą próbkę → Nie; <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. <b>Dla każdego</b> okna analizy <math>i \rightarrow n</math> próbki <b>wykonaj</b>;</li> <li>2.2. <b>Oblicz</b> profil macierzy danego okna analizy;</li> <li>2.3. <b>Zidentyfikuj</b> łańcuch wzorców;</li> <li>2.4. <b>Oblicz</b> całkowity czas trwania procesu technologicznego;</li> <li>2.5. <b>Dodaj</b> czas do wektora wyników;</li> </ol> </li> <li>3. <b>Sprawdź</b> czy przeanalizowano cały zakres analizy → Tak;</li> <li>4. <b>Usuń</b> punkty odstające;</li> <li>5. <b>Oblicz</b> medianę i średni w celu wykazania rzeczywistego czasu procesu technologicznego dla obróbki części;</li> <li>6. <b>Oblicz</b> wartości czasu przygotowawczo-zakończeniowego jako wynik różnicy normatywu czasu procesu technologicznego dla obróbki części i obliczonego całkowitego czasu trwania procesu technologicznego.</li> <li>7. <b>Zapisz</b> wynik;</li> </ol> |                                                                                                                         |

Źródło: Opracowanie własne

- Algorytm dynamiczny wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny

Drugi z algorytmów dotyczy obliczenia wskaźnika OEE dla pracy danej maszyny w danym czasie. Schemat jego działania został zilustrowany na rysunku 64.



Rys. 64. Algorytm dynamiczny wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny  
Źródło: Opracowanie własne

Algorytm dynamiczny składa się z dziewięciu kroków, z czego pięć z nich realizowana jest w pętli odpowiedniej do zakresu danych będących przedmiotem analizy.

Należy zaznaczyć, że OEE to wskaźnik, który przedstawia efektywność biorąc pod uwagę trzy różne aspekty działania maszyny. Dlatego wyliczenie wskaźnika tylko na podstawie założenia, że zidentyfikowany wzorzec wyraża czas operacyjny maszyny realizacji procesu technologicznego dla obróbki części nie jest wystarczające do obliczenia jego wartości. To założenie pozwala określić wymiar dostępności w ramach wskaźnika. Po to by obliczyć cały wskaźnik konieczne jest też przedstawienie dodatkowych danych. Dane dotyczące wydajności i prezentujących straty występujące podczas pracy maszyny, związanych z czynnikami zakłócającymi: spadki szybkości, chwilowe zatrzymanie, uzupełnianie surowca. Dane te mogą być przedstawione przez operatora, określone z góry przez technologa bądź pozyskane z systemu ERP przedsiębiorstwa. Specyfikację algorytmu prezentuje tabela 10.

Tabela 10. Specyfikacja algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nazwa:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Dynamiczny algorytm wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny                                                                                                |
| <b>Wejście:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Zakres analizy – strumień danych<br>Normatyw czasu procesu technologicznego dla obróbki części<br>Ilość braków<br>Ilość produkcji wykonanej<br>Wydajność znamionowa |
| <b>Wyjście:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Wskaźnik OEE danej maszyny                                                                                                                                          |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adekwatnie do długości strumienia oblicz liczbę <math>n</math> okien analizy;</li> <li>2. <b>Sprawdź</b> czy przeanalizowano całą próbkę → Nie; <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. <b>Dla każdego</b> okna analizy <math>i \rightarrow n</math> próbki <b>wykonaj</b>;</li> <li>2.2. <b>Oblicz</b> profil macierzy danego okna analizy przyjmując dane okno analizy czasu procesu obróbki części;</li> <li>2.3. <b>Zidentyfikuj</b> łańcuch wzorców;</li> <li>2.4. <b>Oblicz</b> wskaźnik OEE, przyjmując, że zidentyfikowany wzorzec wyraża czas operacyjny maszyny realizacji procesu technologicznego dla obróbki części;</li> <li>2.5. <b>Dodaj</b> czas do wektor wyników;</li> </ol> </li> <li>3. <b>Sprawdź</b> czy przeanalizowano całą próbkę → Tak;</li> <li>4. <b>Usuń</b> punkty odstające;</li> <li>5. <b>Oblicz</b> medianę i średnią w celu wykazania ogólnego OEE dla analizowanych danych;</li> <li>6. <b>Zapisz</b> wynik;</li> </ol> |                                                                                                                                                                     |

Źródło: Opracowanie własne

W obliczeniu wskaźnika OEE przyjęto założenia opisane w rozdziale 3.2 strategii prowadzenia badań.

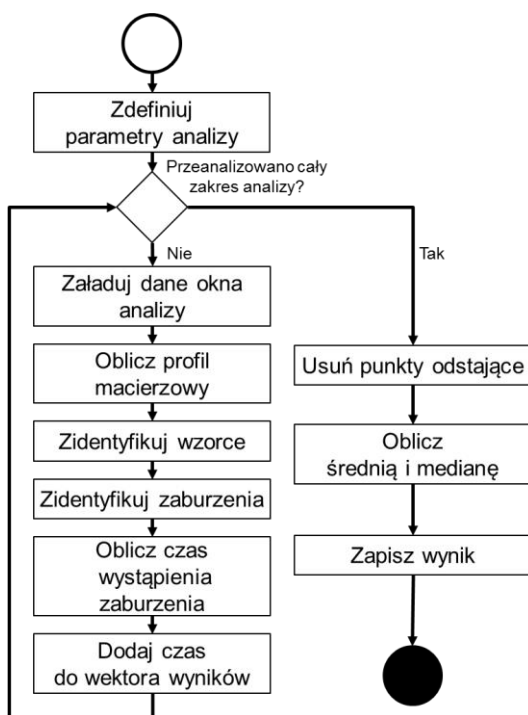
### 3.3.4.2. Algorytmy dynamiczne w kontekście utrzymania ruchu

W kontekście utrzymania ruchu sformułowano jeden algorytm dynamiczny dotyczący wyznaczania czasu wystąpienia zaburzenia. Poniżej załączono schemat ilustrujący działanie algorytmu jak i jego specyfikację.

- Algorytm dynamiczny wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia

Algorytm dynamiczny tej kategorii, podobnie jak poprzednio zdefiniowane, korzysta z założeń określonych na początku rozdziału. Jego działanie nakierowane jest na identyfikację zaburzeń, czyli takich fragmentów szeregu czasowego, które nie znajdują mu podobnych w danym oknie analizy. Dla

każdego okna analizy odnotowywane jest miejsce wystąpienia zaburzenia. Zidentyfikowanie tego momentu jest podstawą do podjęcia działań w celu ustalenia co może być przyczyną zaburzeń. Zaburzenie może powodować brak odpowiedniej kalibracji, zużycie narzędzia, czy też niepożądane działanie operatora. Zidentyfikowanie momentu jest podstawą do prac służb utrzymania ruchu czy operatora i podjęcie przez nich działań. Ostatecznie czas zaburzenia identyfikowany jest jako mediana i średnia czasu, po którym wystąpiło zaburzenie od rozpoczęcia procesu technologicznego dla obróbki części. Algorytm dynamiczny składa się z dziewięciu zadań z czego sześć realizowana jest w pętli adekwatnej do ilości danych będących przedmiotem analizy. Schemat działania algorytmu przedstawia rysunek 65.



Rys. 65 Schemat działania algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia  
Źródło: Opracowanie własne

Szczegółowa specyfikacja działania algorytmu zawarta została w tabeli 11.

Tabela 11. Specyfikacja algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nazwa:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Algorytmu dynamiczny wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia                                  |
| <b>Wejście:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Zakres analizy – strumień danych<br>Normatyw czasu procesu technologicznego dla obróbki części |
| <b>Wyjście:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Czas wystąpienia zaburzenia                                                                    |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adekwatnie do długości strumienia <b>oblicz</b> liczbę n okien analizy;</li> <li>2. <b>Sprawdź</b> czy przeanalizowano całą próbkę → Nie; <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. Dla każdego okna analizy i → n próbki wykonaj;</li> <li>2.2. <b>Oblicz</b> profil macierzy odległości danego okna analizy przyjmując dane okno analizy czasu procesu obróbki części;</li> <li>2.3. <b>Zidentyfikuj</b> łańcuch wzorców;</li> <li>2.4. <b>Zidentyfikuj</b> zaburzenia;</li> <li>2.5. <b>Oblicz</b> czas od rozpoczęcia procesu obróbki części do wykrycia zaburzenia;</li> <li>2.6. <b>Dodaj</b> wartości różnicy do wektora różnic;</li> </ol> </li> <li>3. <b>Sprawdź</b> czy przeanalizowano całą próbkę → Tak;</li> <li>4. Usuń punkty odstające;</li> <li>5. <b>Obliczenie</b> mediany i średniej czasu wystąpienia zaburzenia;</li> <li>6. Zapisz wynik;</li> </ol> |                                                                                                |

Źródło: Opracowanie własne

Algorytm korzysta z rozwiązań implementacyjnych algorytmu wyznaczającego rzeczywisty całkowity czas procesu technologicznego obróbki dla części. Czas zaburzenia liczony jest jako różnica czasu od rozpoczęcia procesu obróbki części do wystąpienia zaburzenia. Różnica na potrzeby badań określona została mianem czasu wystąpienia zaburzenia. Szczegóły implementacji obliczeń różnicy przedstawia lista 10.

Lista 10. Obliczenie czasu wystąpienia anomalii

```

for (mp_lan_element in 1:mp_lan_dlugosc){
  if (mp_zaburzenie$discord$discord_idx < mp_lan_elementy[mp_lan_element]){
    #obliczenia czasu wystąpienia zaburzenia
    anomalia <- mp_anomalia$discord$discord_idx -
      mp_lan_elementy[mp_lan_element - 1]
    zaburzenie_wektor <- c(zaburzenie_wektor, anomalia)
    #zatrzymaj pętlę
    break
  }
}

```

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki działania algorytmów przedstawione zostały w kolejnym rozdziale odpowiednio w kontekście harmonogramu i utrzymania ruchu.

### 3.3.5. Wyniki badań doświadczalnych

Istotą przeprowadzonych badań doświadczalnych było przetestowanie działania algorytmu na danych zarejestrowanych podczas produkcji przemysłowej. Na potrzeby analizy danych zbudowano system pozyskiwania danych i zapisano pliki próbek danych.

Parametryzacja algorytmu do badań doświadczalnych została wykonana na podstawie normatywów czasu procesu technologicznego dla obróbki części, odpowiednio do charakterystyki typu produkcji i realizowanych procesów obróbki. W przypadku tokarki normatyw określono na 10 minut (600 sekund) natomiast w przypadku frezarki normatyw określono jako sześć i pół minuty (390 sekund). Pod uwagę wzięto także fakty zaobserwowane podczas analizy eksploracyjnej, dlatego przyjęto okno analizy wynoszące jedną godzinę.

Badanie zostało przeprowadzone na wyczyszczonych próbkach danych scharakteryzowanych w rozdziale 3.3.2. Algorytmy mogą zostać uruchomione z poziomu platformy analiz udostępnionej w środowisku chmury obliczeniowej (Microsoft Azure Notebooks) jak i środowisku lokalnym. Przy czym, na potrzeby badań przyjęto, że obliczenia prowadzone zostaną lokalnie. Obliczenia przeprowadzone zostały na komputerze z procesorem Intel® Core™ i5-4278U CPU @2.60 GHz i pamięcią RAM 16 GB. Obliczenie profilu dla przyjętego jednogodzinnego okna analizy nie przekraczało 1,5 sekundy, co przedstawia lista 11.

Lista 11. Obliczenia profilu macierzy odległości przy pomocy algorytmu STOMP

```
Warming up parallel with 4 cores.  
STOMP [=====] 100% at 2863 it/s,  
elapsed: 1s, eta: 0s  
Finished in 1.38 secs  
Warming up parallel with 4 cores.  
STOMP [=====] 100% at 3094 it/s,  
elapsed: 1s, eta: 0s  
Finished in 1.34 secs  
Warming up parallel with 4 cores.  
STOMP [=====] 100% at 2929 it/s,  
elapsed: 1s, eta: 0s  
Finished in 1.29 secs
```

Źródło: Opracowanie własne

Algorytm STOMP średnio w ciągu 1 sekundy analizował około 2,9 tysiąca obserwacji. Poniżej przedstawiono wyniki zastosowania opracowanych

algorytmów dynamicznych na rzeczywistych danych produkcyjnych pozyskanych w ramach sporządzonego stanowiska badawczego.

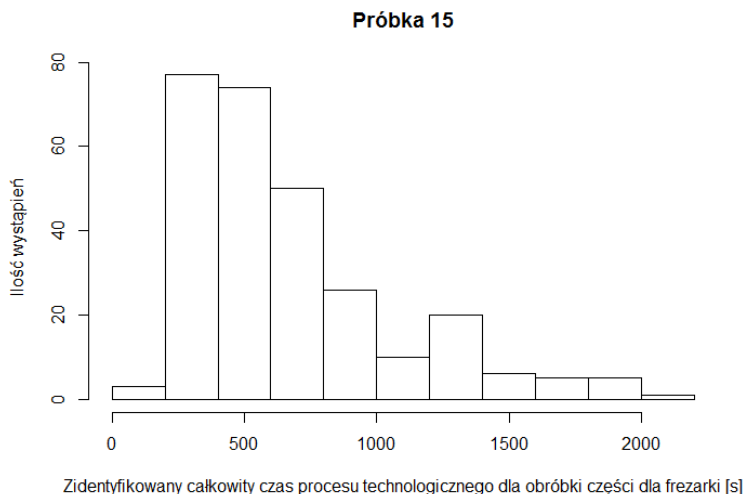
Algorytmy przetestowano w stosunku do wszystkich przygotowanych do analizy próbek. W ramach danych kontekstów w pierwszej kolejności testowano działanie algorytmów na zarejestrowanych danych dla frezarki następnie dla tokarki. Ze względu na dużą ilość próbek prezentowane są wykresy dla wybranych próbek: dla próbki nr 15 dla frezarki i próbki nr 10 dla tokarki. Działanie poszczególnych algorytmów podsumowuje zbiorcze zestawienie prezentujące wyniki końcowe otrzymane dla wszystkich próbek.

### 3.3.5.1. Wyniki w kontekście harmonogramu

W kontekście harmonogramu otrzymano wyniki dla obu opracowanych algorytmów. W pierwszej kolejności zaprezentowane zostaną wyniki algorytmu dynamicznego wyznaczania rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części, a następnie algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny.

- Algorytm dynamiczny wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części

W pierwszej kolejności przetestowano działanie algorytmu na zarejestrowanych danych dla frezarki. Wyniki działania algorytmu dla wybranej próbki prezentuje rysunek 65. Wykres pokazuje, że tendencja centralna czasów obróbki występuje w przedziale 200–600 sekund.



Rys. 66. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części dla próbki nr 15

Źródło: Opracowanie własne

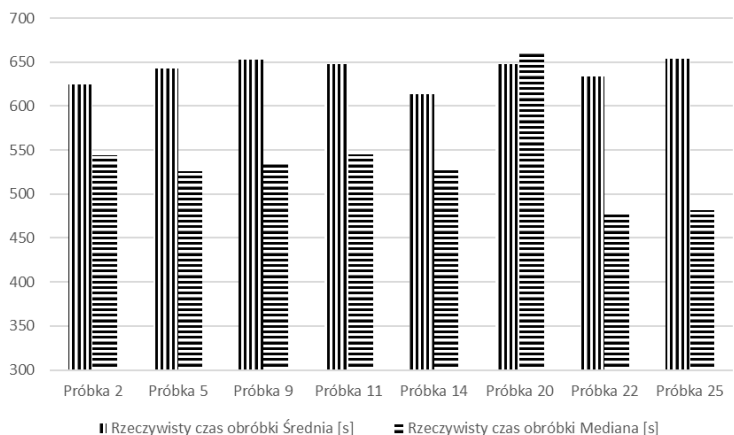
Ponadto zobrazowane dane wykazują, że dla wszystkich zebranych próbek zidentyfikowana została podobna charakterystyka. Dane zidentyfikowanych średnich należą do przedziału 613,53–653,32 sekund (średnio 637,46 sekund), natomiast median 477–663 sekund (średnio 545,83 sekund). Różnica między średnią z próbek, a medianą wynosi 91,62 sekund. Natomiast dla czasu przygotowawczo-zakończeniowego średnie należą do przedziału 223,52–263,32 sekund (średnio 249,33 sekund), a mediany do przedziału 87–273 sekund (średnio 147,68 sekund). Szczegółowe wyniki zestawiono w tabeli 12. Ze względu na niewielką ilość danych nie przedstawiono wyników dla próbki numer 19. Przyjęta metoda czyszczenia skutecznie usunęła większość punktów odstających.

Tabela 12. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części dla frezarki

| Nazwa próbki | Rzeczywisty czas obróbki |             | Czas przygotowawczo-zakończeniowy |             |
|--------------|--------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
|              | Średnia [s]              | Mediana [s] | Średnia [s]                       | Mediana [s] |
| Próbka 2     | 624,34                   | 544,5       | 234,34                            | 154,5       |
| Próbka 5     | 642,5                    | 526         | 252,5                             | 136         |
| Próbka 9     | 652,51                   | 536         | 262,51                            | 146         |
| Próbka 11    | 647,3                    | 545         | 257,3                             | 155         |
| Próbka 15    | 613,52                   | 528         | 223,52                            | 138         |
| Próbka 20    | 647,48                   | 663         | 257,48                            | 273         |
| Próbka 22    | 633,73                   | 477         | 243,73                            | 87          |
| Próbka 25    | 653,32                   | 482         | 263,32                            | 92          |

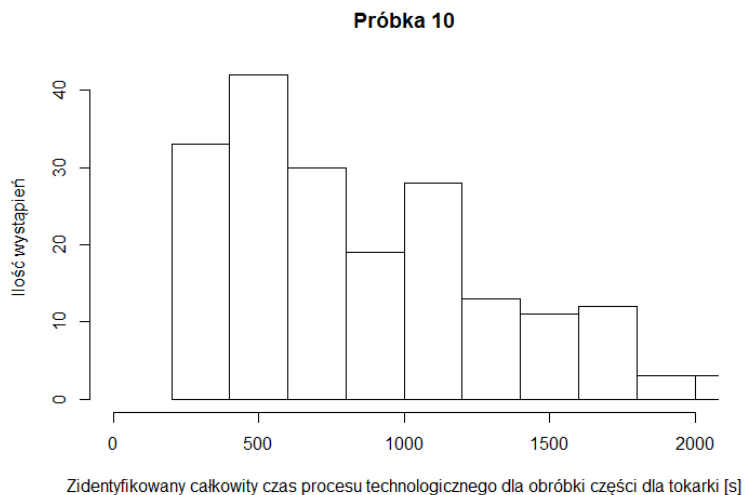
Źródło: Opracowanie własne

Wykres wyników końcowych dla rzeczywistego całkowitego czasu obróbki dla frezarki przedstawia rysunek 67. Uwagę zwraca fakt zauważalnej tendencji wzrostowej, przy czym dla próbki nr 15 pojawia się spadek. Po czym wartości średniej jak i mediany prawie się równają. Przyczyną takiego zdarzenia może być wystąpienie końca realizacji zlecenia produkcyjnego. Zrównanie mediany i średniej oznacza wzmocnioną tendencję centralną, a zatem znacznie mniejszą liczbę punktów odstających, charakteryzujących przestoje.



Rys. 67. Wyniki końcowe dla rzeczywistego całkowitego czasu obróbki dla wszystkich próbek dla frezarki  
Źródło: Opracowanie własne

Tożsame badania zostały przeprowadzone dla zarejestrowanych danych tokarki. Wyniki otrzymane dla algorytmu dynamicznego prezentuje rysunek 68. Otrzymane wyniki wskazują, że tendencja centralna czasu obróbki części skupiona jest wokół wartości 500 sekund.



Rys. 68 Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części dla próbki nr 10

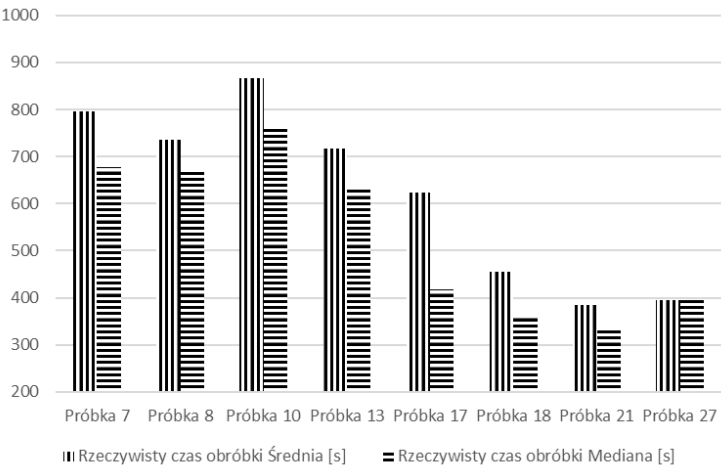
Szczegółowe wyniki końcowe dla próbek danych zestawiono w tabeli 13. Dla danych tokarki wynik działania algorytmu wskazuje, że średni rzeczywisty czas

należy do przedziału 384,76–866,71 sekund (średnio 640,77 sekund), natomiast median 337,5–758 sekund (średnio 530,56 sekund). Różnica między średnią z próbek, a medianą wynosi 19,31 sekund. Natomiast w przypadku czasu przygotowawczo-zakończeniowego średnie należą do przedziału -5,24–476,71 sekund (średnio 231,46 sekund), a median do przedziału -52,5–368 sekund (średnio 140,56 sekund). Minusowe wartości świadczą o tym, że całkowity czas był krótszy niż ten określony przez normatyw.

Tabela 13. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części dla tokarki

| Nazwa próbki | Rzeczywisty czas obróbki |             | Czas przygotowawczo-zakończeniowy |             |
|--------------|--------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
|              | Średnia [s]              | Mediana [s] | Średnia [s]                       | Mediana [s] |
| Próbka 7     | 795,29                   | 677         | 405,29                            | 287         |
| Próbka 8     | 734,76                   | 668         | 344,76                            | 278         |
| Próbka 10    | 866,71                   | 758         | 476,71                            | 368         |
| Próbka 13    | 716,53                   | 631         | 326,53                            | 241         |
| Próbka 17    | 624,37                   | 417         | 234,37                            | 27          |
| Próbka 18    | 454,46                   | 360,5       | 64,46                             | -29,5       |
| Próbka 21    | 384,76                   | 337,5       | -5,24                             | -52,5       |
| Próbka 27    | 394,82                   | 395,5       | 4,82                              | 5,5         |

Źródło: Opracowanie własne



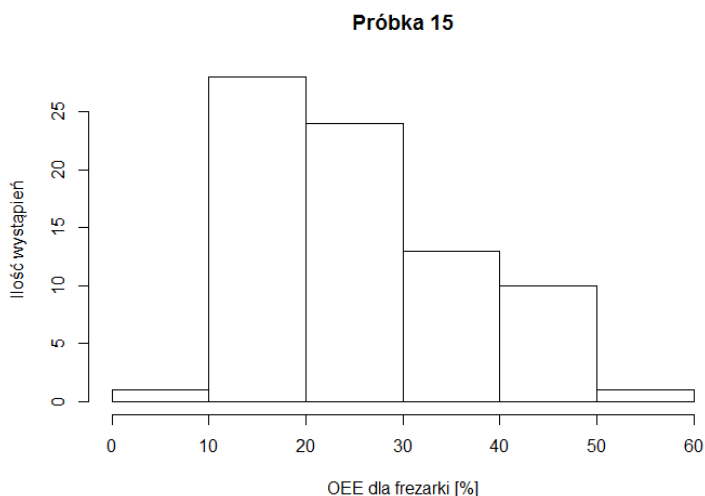
Rys. 69. Wyniki końcowe dla rzeczywistego całkowitego czasu obróbki dla wszystkich próbek dla tokarki  
Źródło: Opracowanie własne

Wykres wyników końcowych przedstawia rysunek 69. Wykazane wartości średniej i median dla kolejnych próbek wykazują tendencję spadkową aż do momentu zrównania dla próbki nr 27. Wskazany spadek może być spowodowany wieloma czynnikami niemniej jednak w danym czasie zatrudniony został nowy pracownik. Można domniemać, że wraz ze wzrostem wiedzy i doświadczenia pracownika czas całkowity stopniowo ulegał skracaniu.

- Algorytm dynamiczny wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny

Zgodnie z założeniami przyjętymi na etapie definiowania algorytmu obliczenie wskaźnika OEE wymaga zestawu danych. Z pomocą metody analizy pozyskanych danych możliwe jest wskazanie dostępności. Przy czym, dla pozostałych miar należy pozyskać te dane poza system. Na potrzeby badań te dane zostały generowane maszynowo w przypadku strat. Dla każdego okna przyjęto losową wartość braków oraz założono wydajność na poziomie dostępności (wyodrębnienie wzorca oznacza wykonanie części). Dzięki temu możliwe było, na potrzeby badań doświadczalnych, obliczenie wskaźnika efektywności.

W pierwszej kolejności przetestowano działanie algorytmu na zarejestrowanych danych dla frezarki. Wyniki działania algorytmu dla wybranej próbki przedstawia rysunek 70. Dla próbki zauważalna jest tendencja centralna obliczonych wartości OEE dla przedziału od 10–30%.



Rys. 70. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej dla próbki nr 15  
Źródło: Opracowanie własne

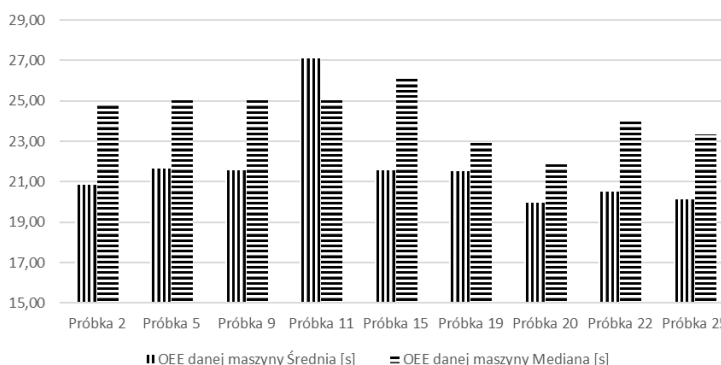
Szczegółowe wyniki końcowe dla próbek danych zestawiono w tabeli 14. Dla danych frezarki wynik działania algorytmu wskazuje, że średni OEE należy do przedziału 19,98–27,12% (średnio 21,65 procent), natomiast median 21,89–26,23% (średnio 24,26%). Różnica między średnią z próbek, a medianą wynosi 2,61%.

Tabela 14. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny dla frezarki

| Nazwa próbki | OEE danej maszyny |             |
|--------------|-------------------|-------------|
|              | Średnia [s]       | Mediana [s] |
| Próbka 2     | 20,83             | 24,85       |
| Próbka 5     | 21,66             | 25,05       |
| Próbka 9     | 21,56             | 25,03       |
| Próbka 11    | 27,12             | 25,02       |
| Próbka 15    | 21,58             | 26,23       |
| Próbka 20    | 21,51             | 22,93       |
| Próbka 22    | 19,98             | 21,89       |
| Próbka 25    | 20,50             | 23,97       |

Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 71 przedstawia, że obliczone wartości średniej i mediany wykazują zmienność i utrzymują się na stałym poziomie. Od próbki 20 wartości nieznacznie maleją ale już zachowują poziom. Dla próbki 11 wartość średniej jest większa jak dla mediany, co oznacza realizację regularnej produkcji i małą ilość nieplanowanych przestojów.

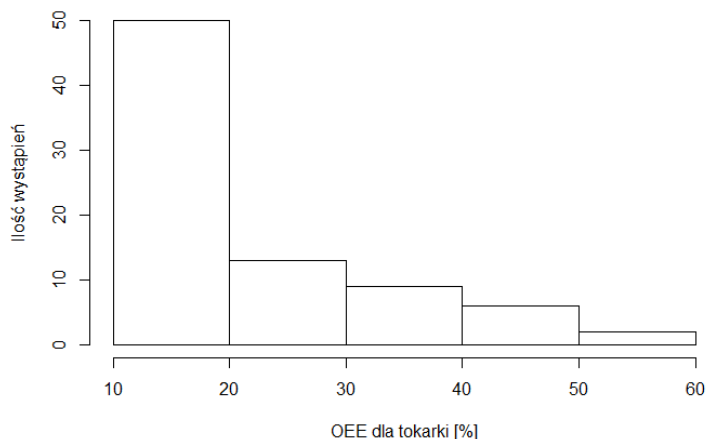


Rys. 71. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny dla wszystkich próbek dla frezarki

Źródło: Opracowanie własne

Następnie prezentowane są wyniki analizy przeprowadzone dla tokarki. Wykresy dla wybranej próbki przedstawia rysunek 72. Dla próbki zauważalna jest tendencja centralna dla obliczonych wartości OEE w przedziale od 10–20%.

**Próbka 10**



Rys. 72. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej dla próbki nr 10

Źródło: Opracowanie własne

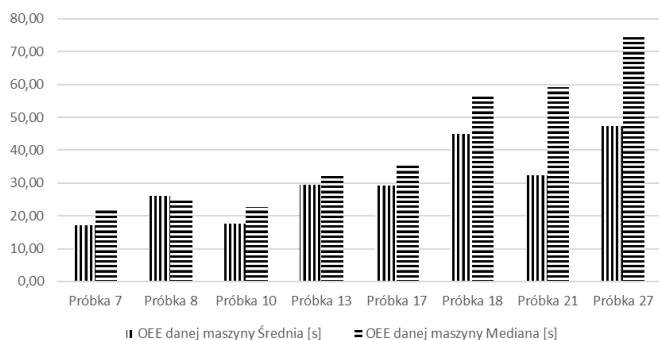
Szczegółowe wyniki końcowe dla próbek danych zestawiono w tabeli 15. Dla danych tokarki wynik działania algorytmu wskazuje, że średni OEE należy do przedziału 17,04–47,34% (średnio 30,50%), natomiast median 21,85–74,88% (średnio 40,94%). Różnica między średnią z próbek, a medianą wynosi 10,44%.

Tabela 15. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny dla tokarki

| Nazwa próbki | OEE danej maszyny |             |
|--------------|-------------------|-------------|
|              | Średnia [s]       | Mediana [s] |
| Próbka 7     | 17,04             | 21,85       |
| Próbka 8     | 26,12             | 24,58       |
| Próbka 10    | 17,60             | 22,60       |
| Próbka 13    | 29,54             | 32,50       |
| Próbka 17    | 29,27             | 35,22       |
| Próbka 18    | 44,82             | 56,68       |
| Próbka 21    | 32,29             | 59,20       |
| Próbka 27    | 47,34             | 74,88       |

Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 73 prezentuje, że obliczone wartości średniej i mediany wykazują wzrost dla obserwowanych próbek.



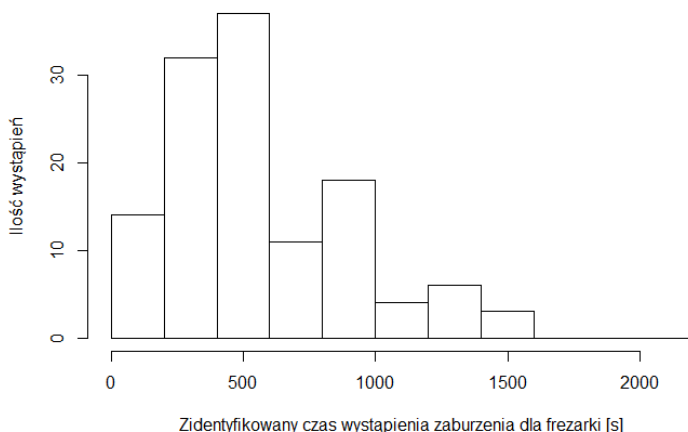
Rys. 73. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny dla wszystkich próbek dla tokarki

Oznacza to, że obserwowana efektywność maszyn wzrasta. Zauważona zależność może tłumaczyć wzrost doświadczenia operatora danego stanowiska, co też zaznaczano dla poprzedniego algorytmu

### 3.3.5.2. Wyniki w kontekście utrzymania ruchu

W kontekście utrzymania ruchu otrzymano następujące wyniki algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia. Wynik obrazujący tendencję centralną czasu wystąpienia zaburzenia wynosi około 500 sekund.

**Próbka 15**



Rys. 74. Wynik otrzymany dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia dla próbki nr 15

Źródło: Opracowanie własne

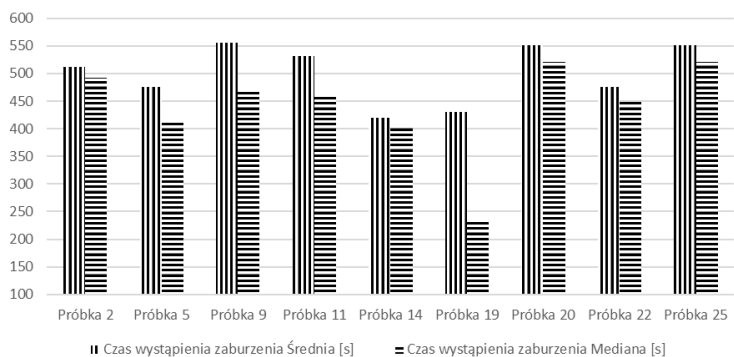
Szczegółowe wyniki końcowe analizy próbek danych zestawiono w tabeli 16. Dla danych frezarki, wynik działania algorytmu wskazuje, że średni czas wystąpienia zaburzenia należy do przedziału 419,63–555,52 sekund (średnio 500,21 sekund), natomiast median 232–521 sekund (średnio 439,88 sekund). Różnica między średnią z próbek, a medianą wynosi 60,32 sekund.

Tabela 16. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania czasu wystąpienia zaburzenia dla danych frezarki

| Nazwa próbki | Czas wystąpienia zaburzenia |             |
|--------------|-----------------------------|-------------|
|              | Średnia [s]                 | Mediana [s] |
| Próbka 2     | 512,61                      | 492         |
| Próbka 5     | 475,67                      | 413         |
| Próbka 9     | 555,52                      | 470         |
| Próbka 11    | 531,82                      | 458         |
| Próbka 15    | 419,63                      | 404         |
| Próbka 19    | 430                         | 232         |
| Próbka 20    | 550,58                      | 521         |
| Próbka 22    | 475,55                      | 448         |
| Próbka 25    | 550,58                      | 521         |

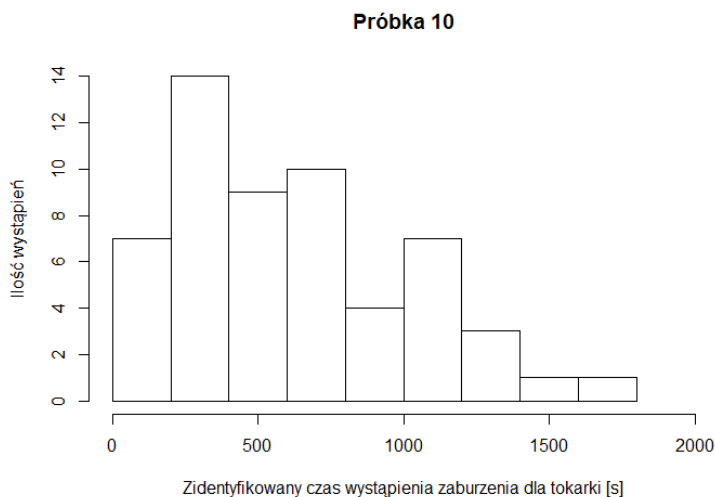
Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 75 pokazuje, że wyznaczone dane średniej i mediany różnił stały dystans co oznacza, że ilość punktów odstających i powtarzalność produkcji była stała, a tym samym zaburzenia występowały w podobnym momencie. To co zwraca uwagę to wynik próbki nr 19. W jej przypadku wartości mediany i średniej są znacznie oddalone, co oznacza, że pojawia się wiele punktów odstających a co za tym idzie przestojów, przy czym zaburzenia wystąpiły znacznie wcześniej. Dla kolejnych próbek uzyskano zbliżone wyniki mediany i średniej. Możliwe, że w związku z problemami na produkcji dokonano działań naprawczych, co prezentuje zaobserwowana zmiana.



Rys. 75. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia dla frezarki  
Źródło: Opracowanie własne

Następnie prezentowane są wyniki analizy przeprowadzone dla tokarki. Wykresy dla wybranej próbki przedstawia rysunek 76.



Rys. 76. Wynik otrzymany dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia dla próbki nr 10  
Źródło: Opracowanie własne

Szczegółowe wyniki końcowe analizy pełnego wolumenu danych zestawiono w tabeli 17. Dla danych tokarki, wynik działania algorytmu wskazuje, że średni czas wystąpienia zaburzenia należy do przedziału 232,86–607,47 sekund (średnio 428,90 sekund), natomiast median 249–605 sekund (średnio 408 sekund). Ze

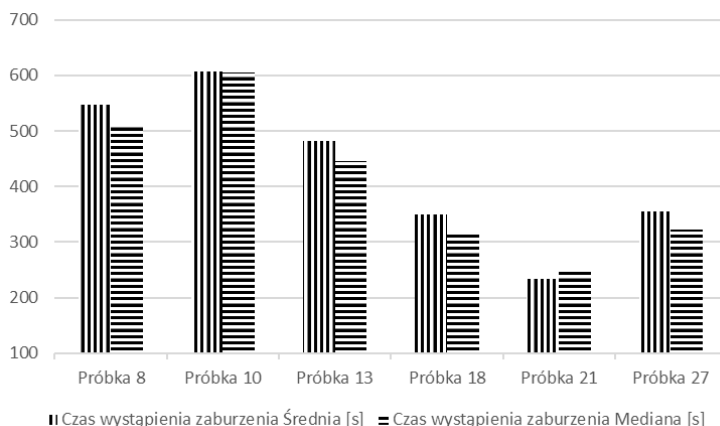
względu na małą ilość danych po procesie czyszczenia nie można było obliczyć wartości średniej oraz mediany dla próbek numer 7 i 17.

Tabela 17. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania czasu wystąpienia zaburzenia dla danych tokarki

| Nazwa próbki | Czas wystąpienia zaburzenia |             |
|--------------|-----------------------------|-------------|
|              | Średnia [s]                 | Mediana [s] |
| Próbka 8     | 546,71                      | 506,5       |
| Próbka 10    | 607,47                      | 605         |
| Próbka 13    | 482,34                      | 445         |
| Próbka 18    | 348,78                      | 319,5       |
| Próbka 21    | 232,86                      | 249         |
| Próbka 27    | 355,26                      | 323         |

Źródło: Opracowanie własne

Przedstawione wyniki końcowe na wykresie (Rys. 77) pokazują, że wartości średniej i mediany są zbliżone. Tym samym produkcja jest regularna, a zaburzenia obserwowane są w podobnym momencie.



Rys. 77. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia dla tokarki

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując, uzyskane wyniki wykorzystania opracowanych algorytmów dynamicznych zależą od ich parametryzacji jak i jakości pozyskanych danych. Im bardziej dokładne dane tym większa możliwość obserwowania większej ilości zależności. Im mniejsze okno analizy kroczącej tym bardziej przetworzone zostaną dane (większa ilość okien analizy), a wyniki bliższe występującym tendencjom centralnym. Powiązanie wyników z rejestrem zdarzeń daje

możliwość wielu zastosowań w kontekście harmonogramu i utrzymania. Wyniki mogą też być wykorzystane jako dane wejściowe dla kolejnych metod analizy danych. Na przykład można je użyć jako dane uczące dla metod przemysłowej sztucznej inteligencji do przewidywania zdarzeń występujących na produkcji. Analiza otrzymanych wyników przeprowadzona została w kolejnym rozdziale.

### **3.3.6. Analiza wyników badań i możliwości ich wykorzystania**

W celu oceny otrzymanych wyników poniżej przeprowadzono analizę rezultatów przeprowadzonych badań doświadczalnych z wykorzystaniem opracowanych algorytmów. W pierwszej kolejności zostanie omówione zostaną wyniki dla algorytmów opracowanych w kontekście harmonogramu, a następnie dla algorytmu zdefiniowanego w kontekście utrzymania ruchu.

#### **3.3.6.1. Analiza w kontekście harmonogramu**

- Algorytm wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części

Przeprowadzona analiza z wykorzystaniem algorytmu pozwoliła na identyfikację czasów trwania procesu obróbki części realizowanego na maszynie w ramach systemu wytwarzania. Algorytm wykazał, że dla badanych próbek występuje tendencja centralna, która skupia się wokół obliczonych miar. Próbkę prezentowały zbliżone charakterystyki częstości i gęstości do całego wolumenu danych.

Doświadczalnie ustalono, że czas trwania operacji odbiega znacząco od normatywnego – wskazywanego orientacyjnie przez technologa. Taki wynik ma swoje uzasadnienie w tym, że produkcja przedsiębiorstwa jest realizowana w małych seriach. Przekłada się to na dużą ilość przestojów związanych z przebrojeniami, oczekiwaniem na transport części do obróbki. W perspektywie zarządzania i obliczeń tendencji centralnej znacząco wydłuża to całokształt czasu procesu technologicznego dla obróbki.

Działanie algorytmu jest zupełnie niezależne od operatora, jak i obsługi stanowisk pracy. Przekazuje dane bezpośrednio do decydentów, którzy w obliczu dynamicznych zmian mogą podejmować decyzje, bądź śledzić na bieżąco zmiany.

W związku z potwierdzoną doświadczalnie powtarzalnością uzyskiwanych wyników dla celów przemysłowych możliwe będzie wykorzystanie opracowanego systemu do planowania przyszłych cykli produkcyjnych. Pozyskane informacje pozwalają na wskazanie w czasie rzeczywistym dostępności poszczególnych stanowisk roboczych. Oznacza to, że proces pozyskiwania informacji na temat aktualnie realizowanej produkcji można skrócić do czasu uruchomienia algorytmów. Oczywiście jest to uzależnione od

wybranego zakresu analizy. Informacje te mogą być użyte do korekty harmonogramów pracy. Zatem z zastosowaniem algorytmu można znacznie zmniejszyć czas planowania nowej produkcji. Harmonogram produkcyjny oparty na realnych normatywach pracy jest podstawą do podjęcia decyzji o realizacji nowego zlecenia produkcyjnego. Mając wiedzę na temat tego jaka jest efektywność produkcji decydenci przedsiębiorstwa mogą podjąć trafną decyzję, co może ustrzec przedsiębiorstwo przed poniesieniem kar umownych, bądź też przed nadmiernym kosztem pracy – związanym z realizacją nadgodzin.

Algorytm obliczany na komputerze o standardowej konfiguracji realizował obliczenia bardzo wydajnie. Obliczenie profilu macierzy dla jednej godziny nie przekraczało czasu 1,5 sekundy czasu procesora. Przy zastosowaniu bardziej wydajnych maszyn czas ten może być dodatkowo skrócony – na przykład w modelu usługowym chmury obliczeniowej.

W związku z powyższym poniżej sformułowano możliwości zastosowania algorytmu.

**Zastosowanie 1: Prognozowanie czasów wykonania zleceń produkcyjnych na podstawie rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego**

Monitorując status maszyny, przy pomocy osobnego niezależnego systemu i biorąc pod uwagę założony program produkcyjny, możliwe jest ustalenie jaką wydajność w rzeczywistości uzyskuje dana maszyna przy produkcji danej części.

Wyodrębnienie tej informacji pozwala na wykonanie prognozy realizacji zlecenia produkcyjnego w oparciu o rzeczywisty czas realizacji zleceń przez system wytwarzania. Dzięki temu minimalizuje się ryzyko poniesienia kar w związku z niedotrzymaniem terminu realizacji zamówienia. Zdobywa się wizerunek godnego zaufania kontrahenta. Natomiast, jeśli czas jest krótszy niż planowany pozwala to lepiej zagospodarować nie wykorzystane zdolności produkcyjne.

**Zastosowanie 2: Wydajne planowanie nowych zamówień i aktualizacja zleceń już realizowanych**

Śledzenie statusu maszyn wraz z określeniem wydajności pozwala na weryfikację wolumenu produkcji w toku. Informacja o wolumenie produkcji w toku jest cenna szczególnie w zakresie planowania nowych zleceń jak i planowania potrzeb materiałowych.

Z drugiej strony wartość produkcji w toku wiąże się z kosztem zamrożonych środków finansowych jakie przedsiębiorstwo ponosi. Im krótszy czas produkcji w toku tym środki finansowe są krócej zamrożone, a tym samym przedsiębiorstwo charakteryzuje większa elastyczność.

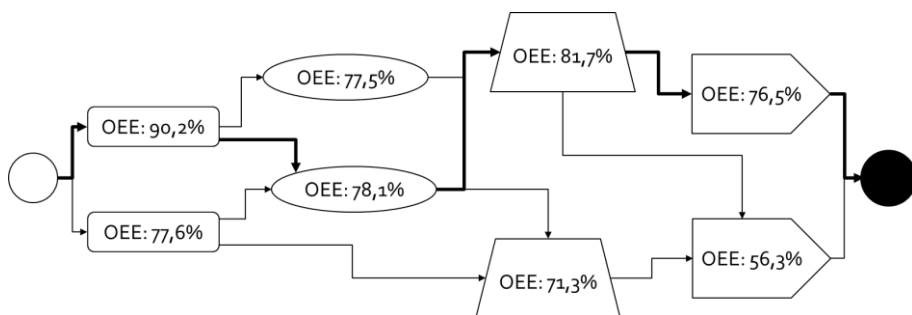
- Algorytm wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny

Wykazana efektywność maszyn kształtowała się na dość niskim poziomie. Przy czym, należy pamiętać, że OEE to formuła polegająca na mnożeniu kolejnych wartości. Zatem po to by otrzymać wysoką wartość OEE wszystkie składowe muszą mieć wysokie wartości. Otrzymane wartości OEE były w głównej mierze uzależnione od przyjętych założeń dotyczących brakujących danych w zakresie wydajności jak i jakości. Tym samym bazowały w większości na mierze dostępności. To co kluczowe pozyskane dane pozwoliły na wykazanie trendu i zaobserwowanie zmiany w czasie. Tym samym mogą być podstawą do formułowania wniosków odpowiednio do widocznych zmian. Mogą być wskazówką dla planisty jak i kierownika produkcji. W związku z tym analogicznie do poprzedniego algorytmu zaproponowano możliwości jego zastosowania.

**Zastosowanie 3: Wskazanie efektywności poszczególnych maszyn jako podstawa do zmiany harmonogramu**

Efektywność określona na poziomie ogólnym dla systemu wytwarzania jest to miara, która podsumowuje działanie całego systemu wytwarzania do wymiaru jednej procentowej wartości. W perspektywie zarządzania jest to bardzo przydatny wskaźnik, bo pozwala uchwycić zmianę i jest podstawą do formułowania decyzji zarządczych w zakresie optymalizacji bądź przyjmowania nowych zleceń. Jeśli w danym okresie efektywność spada, może to być powód do zaniechania decyzji o realizacji kolejnych zleceń bądź, jeśli efektywność wzrasta o przyjęciu nowych. Wskazanie przyczyny poziomu wskaźnika efektywności systemu wytwarzania wymaga jego dekompozycji na efektywność poszczególnych maszyn. Na tym poziomie możliwe jest stwierdzenie jaki poziom efektywności jakich maszyn ma największy wpływ, a jakich najmniejszy na ogólną efektywność systemu. Dzięki tej dekompozycji można zaobserwować, jaka maszyna charakteryzuje się najmniejszą efektywnością – co stanowi wąskie gardło systemu. W takim wypadku kolejne partie danego zlecenia, jeśli to możliwe powinny być realizowane na maszynie o lepszej efektywności.

Daje to podstawę do zastosowania w perspektywie efektywności systemu wytwarzania klasycznych metod sieciowych koncentrujących się na poszukiwaniu optymalnej ścieżki – wskazującej podzbiór maszyn o największej efektywności (Rys. 78), które spełniają wymagania cyklu produkcyjnego.



Rys. 78. Ścieżka najlepszej efektywności  
Źródło: Opracowanie własne

Dzięki wykorzystaniu metod sieciowych można ustalić ścieżkę największej efektywności dla danego systemu wytwarzania w perspektywie określonego cyklu produkcyjnego. Wskazując tę ścieżkę planista otrzymuje informacje jak lepiej harmonogramować przebieg produkcji by uzyskać oczekiwany czas realizacji zlecenia. Wobec zidentyfikowania ścieżki możliwe jest podjęcie strategii, w której zlecenia stanowiące duże partie realizowane są tylko zgodnie ze ścieżką największej efektywności. Natomiast te mniejsze mogą być realizowane przy pomocy pozostałych maszyn. Daje to przestrzeń planistom do lepszego harmonogramowania, uwzględniając aktualny status systemu wytwarzania.

#### Zastosowanie 4: Wykrycie nadużyć, sabotażu systemu wytwarzania przez pracowników

Niezależne rozwiązanie monitorujące pracę maszyn może stanowić narzędzie weryfikacji pracy operatorów. Wykorzystując fakt, że system działa z pominięciem zarówno systemów wewnętrznych maszyny jak i współpracy z operatorem, wykluczona jest możliwość zniekształcenia przesyłanych danych.

Dzięki temu narzędziu, kadra zarządzająca pozyskuje informacje, czy deklarowana przez operatorów wydajność jest najlepszą możliwą, czy też jest mniejsza niż ta deklarowana. Taka weryfikacja może być podstawą do wykazania nadużyć bądź sabotażu związanego z celowym obniżaniem efektywności produkcji. Należy pamiętać, że wskazanie algorytmów nie może być brane dosłownie, ze względu na ich ograniczenia, ale może stanowić indyktor nieprawidłowości i być podstawą wszczęcia kontroli.

### 3.3.6.2. Analiza w kontekście utrzymania ruchu

- Algorytm dynamiczny wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia

Pozyskana przez algorytm informacja na temat czasu wystąpienia zaburzenia może zostać wykorzystana do organizacji zespołów utrzymania ruchu jak i samych operatorów. Identyfikacja zaburzeń może stanowić zwiastun zbliżającej się awarii bądź innego zdarzenia, które może wywołać nieplanowany przestój. Ten sposób identyfikacji wskazuje (podpowiada) w jakim momencie realizacji procesu technologicznego należy zwrócić szczególną uwagę.

Zobrazowane rezultaty działania algorytmu potwierdzają spójną tendencję centralną. Badania doświadczalne potwierdziły to, że dzięki bieżącej identyfikacji zaburzeń procesu obróbki możliwe staje się zidentyfikowanie momentu problematycznego procesu. Identyfikacja takiego momentu stanowi podstawę do prowadzenia działań utrzymania zapobiegawczego i przeprowadzania kontroli tam, gdzie dostrzeżono zaburzenie. Natomiast w przypadku wystąpienia awarii, dzięki stałemu pozyskiwaniu danych procesu, istnieje możliwość zdalnego wskazania, w którym momencie procesu do niej doszło.

W odniesieniu przedstawionych powyżej wniosków sformułowano możliwości zastosowania algorytmu.

**Zastosowanie 5:** Prowadzenie prac utrzymania ruchu adekwatnie do momentu wystąpienia zaburzeń

Monitorowanie efektywności pozwala na przeprowadzenie prac konserwacyjnych bądź naprawczych dokładnie w momencie, w którym efektywność spadła. Monitorowanie zapewnia możliwość wykrycia takiej tendencji, dzięki czemu służby utrzymania ruchu mają możliwość wcześniejszej reakcji.

Monitorując zaburzenia w obrębie strumienia obrazującego realizację procesu technologicznego pozyskiwana jest informacja, w którym momencie dochodzi do największej ilości zaburzeń. Może to być podstawą podjęcia działań naprawczych dotyczących już konkretnej części procesu technologicznego. To znacząco skraca, a zatem usprawnia pracę zespołu utrzymania ruchu. Obserwowanie zmian efektywności w dłuższej perspektywie będzie podstawą do zaobserwowania tendencji, przedstawienia predykcji i podjęcia działań zapobiegawczych, przeciwdziałających awariom.

**Zastosowanie 6:** Szybsze reagowanie na awarie i nieplanowane przestoje

Bieżące monitorowanie pozwala na szybką reakcję na zaistniałą awarię wcześniej. Możliwa jest implementacja reguł, które automatycznie powiadomią

dział utrzymania ruchu w przypadku stwierdzenia zatrzymania procesu technologicznego na czas przekraczający dopuszczalną wartość. Skraca to znacząco czas od wystąpienia zdarzenia nieplanowanego przestoju do momentu rozpoczęcia działań naprawczych.

Przy wykorzystaniu otwiera to możliwość by realizować utrzymanie ruchu maszyn w formie usługi. Wspomniane usługi polegają na tym, że zewnętrzne przedsiębiorstwo monitoruje system wytwarzania, i reaguje, albo poprzez kontakt telefoniczny bądź osobisty na zdarzenia zaobserwowane na produkcji.

#### Zastosowanie 7: Skrócenie przestojów nieplanowanych, jak i przestojów planowanych

Ciągły nadzór efektywności stanowi podstawę do weryfikacji przyjętych rozwiązań systemu wytwarzania. Zakłada się, w drodze dekompozycji składników niskiej efektywności danej maszyny, że odkryte zostaną przyczyny przestojów, ze względu na samą maszynę. Co więcej, odkryć można opóźnienia pojawiające się ze względu na opóźnienia na innych maszynach tego cyklu. Będzie to podstawą do identyfikacji przyczyn nieplanowanych przestojów, jak i skrócenia tych planowanych, w ramach cyklu produkcyjnego.

Podsumowując, rezultaty analizy wyników badań pozwalają na sformułowanie możliwości ich zastosowań. Badania dowodzą, iż opracowane algorytmy oraz prowadzone przy wykorzystaniu ich wyników analizy mogą stanowić komponenty systemu czasu rzeczywistego – dla zarządzania wybranymi aspektami systemu wytwarzania.

Opracowane rozwiązanie może zostać wykorzystane do budowy systemu klasy CPM jako cyfrowego bliźniaka wybranego systemu wytwarzania. Więcej czujników, więcej środków przesyłania danych umożliwi zobrazowanie większego zakresu systemu wytwarzania. To pozwoli na realizację zaawansowanych strategii utrzymania ruchu i szybkie przejście od strategii zapobiegawczej, do strategii preskryptywnej utrzymania ruchu.

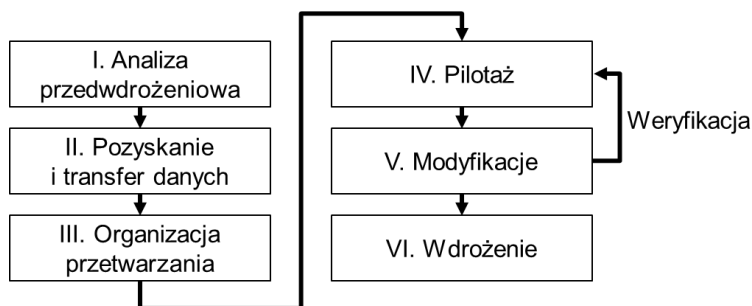
### **3.4. Metodyka poprawy efektywności systemu wytwarzania**

Prace doświadczalne w obszarze produkcji w ramach badań doświadczalnych pozwoliły na sformułowanie metodyki określającej zestaw niezbędnych działań służących wykorzystaniu opracowanych algorytmów dynamicznych do poprawy efektywności systemu wytwarzania. Metodyka w formie procedury systematyzuje proces i określa jakie działania należy podjąć, by poprawić efektywność systemu wytwarzania.

Zadaniem metodyki jest dostarczenie uniwersalnego podejścia oraz wyodrębnienie sekwencji etapów, które pozwolą na wykorzystanie algorytmów w kontekście przetwarzania sygnałów obrazujących proces wytwarzania. Wyniki analizy z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych pozwalają na dynamiczną identyfikację statusu maszyn tworzących system wytwarzania, a to pozwala obliczyć wskaźnik efektywności całego systemu.

Formułując metodykę zakłada się, zewnętrzną i niezależną od uwarunkowań licencyjno-technicznych danej maszyny rejestrację sygnału obrazującego jej działanie. Nie zakłada się konieczności realizacji integracji w zakresie wymiany danych z systemami sterowania maszyn. System będzie bazował na wewnętrznym modelu danych i specyfikacji komunikatów. Co więcej, nie zakłada się pozyskiwania umów na dokonywanie zmian w bryle maszyny. Taka ingerencja mogłaby się wiązać z utratą praw gwarancyjnych bądź uszkodzeniem maszyny. Oczywiście, istnieje możliwość włączenia strumienia danych generowanych przez systemy wewnętrzne maszyn, ale wiąże się to z rozwiązaniem powyżej sygnalizowanych problemów. Ponadto, ingerencja może skutkować koniecznością implementacji interfejsu zapewniającego zgodność z uniwersalnym standardem wymiany danych i adekwatnych protokołów (na przykład OPC UA).

Metodyka wskazuje jak wykorzystując technologie klasy przemysł 4.0 oraz opracowane algorytmy można pozyskiwać dane o efektywności systemu wytwarzania. Opisane podejście ma na celu określenie rozwiązań, które zapewni lepszy wgląd w funkcjonowanie systemów wytwarzania przedsiębiorstw. Rozwiązań, które będą w stanie pozyskiwać dane w czasie rzeczywistym, a następnie je przetwarzać tak by identyfikować status zarówno maszyny pojedynczego stanowiska roboczego jak i całego systemu wytwarzania. Wytworzenie takiego rozwiązania dla danego przedsiębiorstwa, odpowiadając na jego potrzeby, stanowi proces. W związku z tym potrzebne są wskazówki, dobre praktyki jak takie rozwiązanie tworzyć. Dlatego też w wyniku prac doświadczalnych określono etapy metodyki, zilustrowane na rysunku 79.



Rys. 79. Etapy opracowanej metodyki  
Źródło: Opracowanie własne

Metodyka składa się z sześciu etapów. Pomiędzy etapem piątym a czwartym zaprojektowano sprzężenie zwrotne, które pozwala na weryfikację wprowadzonych modyfikacji.

Ponadto by zapewnić uniwersalność metodyki założono, że wskaże ona klasę rozwiązań informatycznych, a nie konkretne przykłady oprogramowania. To, jakie narzędzia zostaną wykorzystane do wdrożenia algorytmów zależy od aktualnie dostępnych zasobów bądź wykorzystywanych natywnych technologii systemów informatycznych przedsiębiorstwa. Dobór ten też zależy od aktualnych potrzeb i możliwości danego przedsiębiorstwa, rozważającego możliwości wdrożenia metody analizy z wykorzystaniem algorytmów dla poprawy efektywności.

## I. Analiza przedwdrożeniowa

Celem etapu jest określenie potrzeb informacyjnych przedsiębiorstwa w zakresie efektywności. Analiza ma za zadanie odpowiedzieć na pytanie czy obecne mechanizmy monitorowania efektywności pozwalają na realizowanie działań poprawy systemu wytwarzania. Etap realizowany jest poprzez:

### 1. Zgromadzenie informacji dotyczących systemu wytwarzania

Przeprowadzenie wywiadów z pracownikami. Obserwacja procesów realizowanych przez system wytwarzania. Analiza dokumentów systemu jakości. Analiza innych przekazanych materiałów.

### 2. Określenie potrzeb w zakresie efektywności poprzez analizę zakresu

Zdefiniowanie potrzeb dostarczenia informacji zwrotnej w zakresie efektywności zarówno dla poziomu zarządczego jak i wykonawczego przedsiębiorstwa. Ocena obecnych procesów monitorowania systemów wytwarzania.

### 3. Specyfikację wymagań w zakresie pozyskiwania danych efektywności

Sformułowanie wymagań zgodnie ze zidentyfikowanymi potrzebami. Priorytetyzacja wymagań celem ustalenia zakresu zgodnie z metodą MoSCoW (grupując wymagania zgodnie z następującymi kategoriami: musi być (*ang. must*), powinno być (*ang. should*), może być (*ang. could*), nie będzie (*ang. will not*)).

#### 4. Wskazanie maszyn systemu wytwarzania

Wskazanie maszyn, które właściwie do zidentyfikowanych potrzeb pozyskania danych o efektywności – zostaną monitorowane.

#### 5. Określenie punktów pomiaru danych

Weryfikacja możliwości i dobór punktów pomiaru. Odpowiednio do rodzaju procesu technologicznego i jego charakterystyki może być realizowany pomiar drgań, nacisku, temperatury, ciśnienia i innych. Dokładność realizowanego pomiaru zależy ściśle od zgłoszonych potrzeb.

#### 6. Opracowanie koncepcji wdrożenia i specyfikacji sposobu realizacji wymagań poprawy efektywności systemu wytwarzania

Sporządzenie dokumentu planu działania zawierającego listę wymagań, sposób ich implementacji i projekt techniczny instalacji elementów systemu pozyskiwania danych efektywności.

**Rezultat:** Dokument planu działania, Projekt techniczny  
**Odpowiedzialny:** Analityk, Kierownik Produkcji, Technolog, Pracownicy

### II. Pozyskanie i transfer danych

Celem etapu jest pozyskanie i organizacja transferu danych na potrzeby analizy zgodnie ze wyspecyfikowanymi wymaganiami Etapu 1. Etap realizowany jest poprzez:

#### 1. Dostosowanie infrastruktury sieci komputerowej przedsiębiorstwa w obszarze hali produkcyjnej umożliwiającej bezprzewodowy i przewodowy transfer danych

W celu umożliwienia pozyskiwania danych konieczna jest budowa infrastruktury technicznej, która zapewni możliwości transferu wielu strumieni danych jednocześnie. W tym celu, przedsiębiorstwo by dostosować infrastrukturę powinno zinwentaryzować dostępną infrastrukturę sieci (przełączniki, routery, okablowanie, punkty dostępowe) i wykonać projekt rozbudowy. Właściwie dla projektu powinno przeprowadzić instalację.

#### 2. Instalację dedykowanej infrastruktury komputerowej odpowiedzialnej za wstępne przetwarzanie i transfer danych z poziomu hali przemysłowej przedsiębiorstwa

Przesłanie strumienia danych do poziomu agregacji albo przetwarzania wymaga jego wstępnej obróbki. Strumień danych odbierany przez komputery lokalne zawiera oprócz samego zapisu danych pomiarowych zawiera wiele dodatkowych danych (czas powstania danych, awarie, poziom baterii czujnika). W tym kroku podejmowana jest decyzja, które dane należy przesłać dalej do poziomu analitycznego.

### 3. Instalację narzędzi pomiarowych rejestracji sygnału maszyn

Zgodnie z przyjętym projektem technicznym wykonana zostaje instalacja narzędzi pomiarowych (czujników). W zależności od rodzaju maszyny oraz realizowanego procesu technologicznego dobierany jest odpowiedni sposób montażu. Sposób montażu czujników nie powinien w żaden sposób utrudniać pracy operatora. Ponadto nie powinien powodować uszkodzenia maszyny bądź czujnika. Zastosowany czujnik powinien być zabezpieczony przed wpływem czynników fizyko-chemicznych związanych z prowadzonym procesem technologicznym.

**Rezultat:** Wdrożona infrastruktura sieci i komputerów lokalnych,  
Zainstalowane narzędzia pomiarowe

**Odpowiedzialny:** Inżynier wdrożeniowy, Kierownik Produkcji

## III. Organizacja przetwarzania

Celem etapu jest wytworzenie rozwiązania przetwarzania strumieni danych z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych. Etap realizowany jest poprzez:

1. Konfiguracja oprogramowania narzędziowego komputerów lokalnych odpowiedzialnych za wstępne przetwarzanie i transfer danych z poziomu hali przemysłowej przedsiębiorstwa

Konfiguracja komputerów lokalnych służy umożliwieniu przepływu strumieni danych od narzędzi pomiarowych do poziomu analitycznego. Instalowane oprogramowanie pozwala na filtrowanie strumienia danych tak by na poziom analityczny trafiły tylko te dotyczące monitorowanego procesu. Ponadto konfiguracja obejmuje wdrożenie procesów archiwizacji, które w przypadku awarii środowiska sieci pozwalają na zapis danych.

2. Wybór i konfiguracja usługi agregacji danych

W tym momencie na rynku funkcjonuje wiele usług jak i form agregacji danych. Usługa ta może zostać wytworzona lokalnie, ale może być też zakupiona od zewnętrznego dostawcy. Zależy to od polityki bezpieczeństwa

przedsiębiorstwa, która specyfikuje czy dane pozyskiwane z poziomu hali mogą być przesyłane po za przedsiębiorstwo do zewnętrznych dostawców usług informatycznych.

### 3. Wytworzenie bazy danych normatywów czasów obróbki wytwarzanych części

Baza danych normatywów czasów obróbki części jest niezbędna do parametryzacji algorytmów dynamicznych. W perspektywie danych normatywnych możliwe jest wyodrębnianie wzorca procesu obróbki w analizowanym strumieniu danych.

### 4. Wytworzenie bazy danych harmonogramu realizacji produkcji

Baza danych harmonogramu realizacji produkcji stanowi podstawę wykazania efektywności. Służy do określenia różnicy obserwowanej efektywności z efektywnością planowaną. Baza danych harmonogramu może być pozyskana w drodze integracji z systemami dziedzinowymi klasy ERP przedsiębiorstwa.

### 5. Wytworzenie bazy danych zdarzeń produkcyjnych

Do bazy kierowane są wszelkie zgłoszenia zdarzeń obserwowane przez operatorów, pracowników działów utrzymania ruchu, kierowników produkcji zarządzających produkcją. Zgłoszenia mogą być rejestrowane przez kierownika produkcji w systemie zgłoszeniowym bądź zgłaszane przez operatorów za pomocą aplikacji mobilnej. Wytworzona baza posłuży do pełnego opisu realizowanych zdarzeń.

### 6. Wybór i konfiguracja środowiska aplikacyjnego realizującego przetwarzanie danych

W zakresie analizy danych dostępnych jest wiele różnych silników i narzędzi. W zależności od ilości danych warto rozważyć rozwiązanie działające w chmurze obliczeniowej, ale może to być też rozwiązanie lokalne. Kwestią decydującą jest ilość strumieni mających być przeanalizowanych i to, czy ich ilość zmienia się w czasie. Jeśli tak, warto zastosować rozwiązanie usługi chmury, w przeciwnym wypadku dotychczasowa infrastruktura przedsiębiorstwa może nie wystarczyć. Niemniej jednak musi być to przedmiotem analizy.

### 7. Wdrożenie w środowisku aplikacyjnym algorytmów dynamicznych

Wdrożenie algorytmów w środowisku aplikacyjnym wiąże się z instalacją bibliotek kodu implementujących obliczenie profilu macierzowego. Biblioteki te

dostępne są w językach wysokiego poziomu takich jak: R, Python, Go lub MATLAB. Język implementacji warunkuje dobór platformy aplikacyjnej.

## 8. Określenie sposobu wykorzystania wyników

Wdrożone algorytmy wyodrębniają w sygnale wzorce, które są podstawą do identyfikacji efektywności w danym systemie wytwarzania. Ta analiza pozwala wyznaczyć efektywność zarówno na poziomie całego systemu jak i poszczególnych maszyn występujących w cyklu produkcyjnym. Konieczne jest podjęcie decyzji zarządczej jak wyniki działania algorytmu mają zostać wykorzystane w kontekście harmonogramu i utrzymania ruchu. Możliwe zastosowania w kontekście harmonogramu:

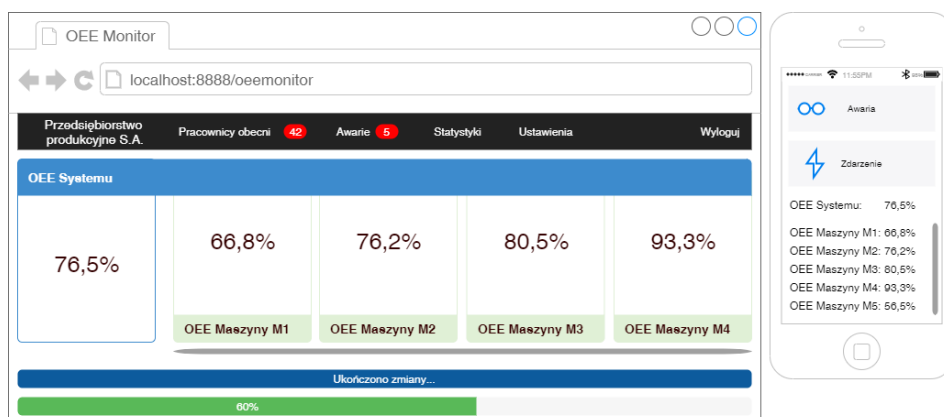
- wskazanie efektywności poszczególnych maszyn jako podstawa do zmiany harmonogramu,
- prognozowanie czasów wykonania zleceń produkcyjnych na podstawie rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego,
- wydajne planowanie nowych zamówień i aktualizacja zleceń już realizowanych,
- wykrycie nadużyć, sabotażu systemu wytwarzania przez pracowników.

Możliwe zastosowania w kontekście utrzymania ruchu:

- prowadzenie prac utrzymania ruchu adekwatnie do momentu wystąpienia zaburzeń,
- szybsze reagowanie na awarie i nieplanowane przestoje,
- skrócenie przestojów nieplanowanych, jak i przestojów planowanych.

## 9. Określenie sposobu prezentacji wyników

Wyniki działania algorytmu wraz z wykazaną efektywnością mogą być prezentowane zarówno na interfejsach dedykowanych dla kadry kierowniczej, jak i dla pracowników. Mogą być wyświetlane bezpośrednio na monitorach hali produkcyjnej bądź przesyłane na urządzenie mobilne operatorów. Przykładowe widok interfejsów przedstawia rysunek 80.



Rys. 80. Przykładowe interfejsy strony www i aplikacji mobilnej prezentujące wyniki rozwiązania  
Źródło: Opracowanie własne

**Rezultat:** Wytworzone rozwiązanie przetwarzania danych efektywności

**Odpowiedzialny:** Inżynier wdrożeniowy, Programista

#### IV. Pilotaż

Celem etapu jest realizacja wstępnego uruchomienia systemu mającego na celu przede wszystkim rozpoznanie podstawowych problemów wdrożeniowych oraz zebranie know-how niezbędnego do dostosowania rozwiązania do specyfiki danego przedsiębiorstwa. Etap realizowany jest poprzez:

1. Realizację wstępnego uruchomienia rozwiązania na wybranym podzbiore maszyn systemu wytwarzania

Rozwiązanie uruchamiane jest tylko dla wybranego podzbioru maszyn systemu wytwarzania. Podzbiór maszyn powinien składać się co najmniej z jednej maszyny danej kategorii tworzącej system wytwarzania.

2. Szczegółowe monitorowanie działania infrastruktury i rozwiązania

W zależności od założonego planu okres monitorowania pozwala sprawdzić funkcjonowanie rozwiązania w warunkach odpowiednich danemu przedsiębiorstwu. Wiąże się to z wystąpieniem problemów zarówno w zakresie pozyskiwania danych, przesyłania i analizy. W tym czasie interesariusze zgłaszają uwagi oraz sugestie by bardziej dopasować system do ich potrzeb.

**Rezultat:** Rejestr uwag i błędów

**Odpowiedzialny:** Inżynier wdrożeniowy, Kierownik produkcji

## V. Modyfikacje

Celem etapu jest dostosowanie rozwiązania do specyfiki danego przedsiębiorstwa. Etap realizowany jest poprzez:

### 1. Analiza wyników fazy pilotażu

Podsumowanie ilości i charakterystyki (przyczyny, okoliczności) zarejestrowanych błędów.

### 2. Sformułowanie działań naprawczych w zakresie zgłoszonych błędów

W zależności od kategorii błędu ustalenie działań naprawczych w gronie operatorów jak i kadry kierowniczej.

### 3. Modyfikacje w zakresie infrastruktury, konfiguracji, sposobów prezentacji

Realizacja działań naprawczych zgodnie ze wskazanym zakresem.

### 4. Stabilizacja działania rozwiązania

Rozwiązanie powraca do fazy pilotażu, gdzie jest ponownie weryfikowane i monitorowane. Jeśli wszystkie zarejestrowane błędy zostały usunięte i nie występują problemy uniemożliwiające działanie systemu, etap uważa się zamknięty.

**Rezultat:** Dopracowane rozwiązanie w zakresie infrastruktury oraz środowiska aplikacyjnego

**Odpowiedzialny:** Inżynier wdrożeniowy, Analityk, Programista

## VI. Wdrożenie

Celem etapu jest wdrożenie produkcyjne rozwiązania. Etap realizowany jest poprzez:

### 1. Realizację uruchomienia rozwiązania dla całego systemu wytwarzania

Rozwiązanie wdrożone jest dla pozostałych maszyn systemu wytwarzania.

## 2. Wytworzenie dokumentacji użytkownika i administratora systemu

Opracowana jest dokumentacja użytkownika opisująca użytkowanie systemu. W przypadku użytkownika objaśniane są generowane metryki. Jeśli została wdrożona aplikacja mobilna, objaśnia się jej funkcjonowanie. Z perspektywy administratora dokumentacja zawiera opis konfiguracji. Opis zawiera domyślny sposób konfiguracji wraz z możliwym zakresem. Ponadto dokumentacja zawiera opis najczęściej zadawanych pytań w kwestii eliminacji problemów.

## 3. Szkolenia użytkowników systemu

Przeprowadzane jest szkolenie na temat konfiguracji i rozwiązywania typowych problemów.

## 4. Utrzymanie systemu

Świadczona jest usługa wsparcia w zakresie rozwiązywania problemów jak i naprawy poszczególnych składników rozwiązania.

**Rezultat:** Wdrożone rozwiązanie w zakresie infrastruktury oraz środowiska aplikacyjnego

**Odpowiedzialny:** Inżynier wdrożeniowy, Kierownik Produkcji, Operatorzy

Podsumowując, wskazana metodyka stanowi uniwersalny (możliwy do zastosowania dla różnych systemów wytwarzania) tok postępowania przy wdrażaniu rozwiązań zapewniających pozyskiwanie danych o efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań agregacji i analizy danych.

## 4. Wnioski

Analiza literatury oraz przeprowadzone badania dają podstawę do sformułowania wniosków końcowych. Zostały one podzielone na trzy części: wnioski poznawcze, wnioski praktyczne oraz kierunek dalszych badań.

### 4.1. Wnioski poznawcze

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na potwierdzenie postawionych tez oraz osiągnięcie celu pracy, którym było opracowanie metodyki poprawy efektywności systemu wytwarzania za pomocą opracowanych algorytmów dynamicznych.

Tezę pierwszą, w następującym brzmieniu, że *istnieje możliwość określenia statusu maszyny produkcyjnej na podstawie analizy dyskretnego sygnału obrazującego realizację procesu technologicznego obróbki części z wykorzystaniem opracowanych algorytmów dynamicznych*, udowodniono na podstawie wyników badań doświadczalnych z wykorzystaniem opracowanych algorytmów dynamicznych. Opracowano trzy algorytmy dynamiczne zarówno w kontekście harmonogramu, jak i utrzymania ruchu. Opracowane algorytmy pozwoliły na określenie statusu maszyny produkcyjnej na podstawie analizy dyskretnego sygnału obrazującego realizację procesu technologicznego.

Natomiast drugą tezę, w następującym brzmieniu, że *identyfikacja statusu poszczególnych maszyn systemu wytwarzania w czasie rzeczywistym pozwala na poprawę efektywności systemu wytwarzania poprzez lepsze wykorzystanie maszyn produkcyjnych w kontekście harmonogramu i utrzymania ruchu* udowodniono w wyniku sformułowania możliwości zastosowań wyników badań, jak i sformułowaniu metodyki poprawy efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem opracowanego rozwiązania pozyskującego dane z poziomu hali produkcyjnej w czasie rzeczywistym. Określona metodyka to rezultat prac nad wdrożeniem opracowanych algorytmów w warunkach przemysłowych. Zdefiniowana metodyka stanowi uniwersalny (możliwy do zastosowania dla różnych systemów wytwarzania) tok postępowania przy wdrażaniu rozwiązań zapewniających pozyskiwanie danych o efektywności systemu wytwarzania. Dlatego też metodyka opracowana w pracy doktorskiej może być użyta w przemyśle w perspektywie różnych systemów wytwarzania z wykorzystaniem otwartych technologii informatycznych i standardowej infrastruktury komputerowej.

Jako oryginalne osiągnięcie przedstawionego rozwiązania wskazuje się:

- opracowanie i wdrożenie otwartego systemu ciągłej akwizycji danych stanu procesu obróbki jednocześnie dla wielu maszyn różnych producentów przy zastosowaniu rozwiązań internetu rzeczy,

- określenie metody pozyskiwania danych z wykorzystaniem bezprzewodowej komunikacji i zdalnej agregacji danych – niezależnej od oprogramowania maszyny,
- opracowanie algorytmów dynamicznych wyznaczania:
  - rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części
  - wskaźnika efektywności danej maszyny,
  - czasu wystąpienia zaburzenia,
- zaimplementowanie algorytmów przy pomocy języka programowania wysokiego poziomu,
- przedstawienie możliwości zastosowań algorytmów dynamicznych,
- sformułowanie metodyki poprawy efektywności systemu wytwarzania z wykorzystaniem algorytmów dynamicznych,
- stworzenie rozwiązania klasy przemysłu 4.0 pozyskiwania i analizy danych z wykorzystaniem rozwiązań internetu przedmiotów, chmury obliczeniowej, mgły obliczeniowej i systemów cyber-fizycznych.

## 4.2. Wnioski praktyczne

Opracowana metodyka wykorzystująca opracowane algorytmy dynamiczne może znaleźć zastosowanie w warunkach przemysłowych. Udowodniono to przez przeprowadzenie badań doświadczalnych w trakcie realizowanej produkcji przemysłowej na wydziale obróbki skrawaniem przedsiębiorstwa produkcyjnego.

W związku z potwierdzoną doświadczalnie powtarzalnością uzyskiwanych wyników dla celów przemysłowych możliwe będzie wykorzystanie opracowanego systemu pozyskiwania danych do poprawy efektywności w ramach planowania przyszłych cykli produkcyjnych. Oznacza to, że proces pozyskiwania danych na temat aktualnie realizowanej produkcji można skrócić do czasu uruchomienia algorytmów dynamicznych.

Harmonogram produkcyjny oparty na realnych normatywach pracy jest podstawą do decyzji o realizacji nowego zlecenia produkcyjnego. Mając wiedzę na temat tego jaka jest efektywność produkcji decydenci przedsiębiorstwa mogą podjąć trafną decyzję, co może ustrzec przedsiębiorstwo przed poniesieniem kar umownych, bądź też nadmiernym kosztem pracy – związanym z realizacją nadgodzin.

Dzięki identyfikacji zaburzeń procesu obróbki możliwe staje się wyprzedzenie zbliżającej się awarii dzięki usunięciu wady zanim ta spowoduje awarię. Identyfikacja takiego momentu stanowi podstawę do prowadzenia działań utrzymania zapobiegawczego i przeprowadzania kontroli tam, gdzie jest potrzebna. Natomiast w przypadku wystąpienia awarii istnieje możliwość wskazania, w którym momencie procesu do niej doszło.

Opracowane algorytmy wymagają minimum konfiguracji i są niezależne od źródła danych. Dzięki temu mogą być analizowane dane z różnych maszyn produkcyjnych, zarówno tradycyjnych, jak i sterowanych numerycznie.

Podmiotami, w których dane rozwiązanie może znaleźć zastosowanie, są przedsiębiorstwa realizujące obróbkę skrawaniem, szczególnie w przypadku dużych systemów wytwarzania.

### **4.3. Kierunek dalszych badań**

W nawiązaniu do analizy literatury oraz uzyskanych wyników badań eksperymentalnych zasadne jest podjęcie dalszych działań, których celem będzie pozyskanie danych systemu wytwarzania ze znacznie większą częstotliwością próbkowania. W takiej sytuacji możliwe było by wykorzystanie algorytmów nie tylko do identyfikacji statusu maszyny, ale i realizowanych na maszynie operacji. Bardziej czułe narzędzie pozwoliłoby na identyfikację anomalii na poziomie pracy poszczególnych narzędzi realizujących proces obróbki. Większa ilość danych pozwala dokładniej odwzorować system wytwarzania w warstwie cyfrowej systemów wsparcia produkcji. Badania będą zmierzały w kierunku większej liczby zastosowań algorytmów dynamicznych bazujących na profilu macierzy w przemyśle – w celu budowy w pełni autonomicznego systemu poprawy efektywności systemu wytwarzania – działającego w ramach cyfrowej fabryki.

## Literatura

- [1] Adamson G., Holm M., Moore P., Wang L., *A Cloud Service Control Approach for Distributed and Adaptive Equipment Control in Cloud Environments*, „Procedia CIRP”, 2016, 41, s. 644–649.
- [2] Aditya B., *Algorytmy*, Gliwice, Wydawnictwo Helion, 2017.
- [3] Ansari F., Glawar R., Sihn W., *Prescriptive Maintenance of CPPS by Integrating Multimodal Data with Dynamic Bayesian Networks*, [w:] *Machine Learning for Cyber Physical Systems Technologies for Intelligent Automation*, Berlin, Springer Vieweg, 2020, s. 1–8.
- [4] Antosz K., Pacana A., *Wskaźnikowa ocena efektywności funkcjonowania maszyn na przykładzie wybranego przedsiębiorstwa – studium przypadku*, [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, pod red. Knosala R., T. 2, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2016.
- [5] Arantes M., Bonnard R., Mattei A. P., De Saqui-Sannes P., *General architecture for data analysis in industry 4.0 using SysML and model based system engineering*, [w:] *12<sup>th</sup> Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2018 – Proceedings*, 2018, s. 1–6.
- [6] Bersch S. D., Azzi D., Khusainov R., Achumba I. E., Ries J., *Sensor data acquisition and processing parameters for human activity classification*, „Sensors”, 2014, 14, no 3, s. 4239–4270.
- [7] Bhosale K. U., Galande A. B., Jadhav P. S., *Industrial Automation using IoT with Raspberry Pi*, „International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)”, 2017, 4, no 6, s. 44–48.
- [8] Bischoff F., Rodrigues P., *Tsmr: An R Package for Time Series with Matrix Profile*, „arXiv:1904.12626 [cs.DB]”, 2019.
- [9] Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S., *Fog computing and its role in the internet of things*, [w:] *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing – MCC '12*, 2012, s. 13.
- [10] Borkowski S., Ulewicz R., *Zarządzanie produkcją Systemy produkcyjne*. Wyd. 3, Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec, 2009.
- [11] Botkina D., Hedlind M., Olsson B., Henser J., Lundholm T., *Digital Twin of a Cutting Tool*, *Procedia CIRP*, 2018, 72, s. 215–218.
- [12] Büchi G., Cugno M., Castagnoli R., *Smart factory performance and Industry 4.0, Technological Forecasting and Social Change*, „Technological Forecasting and Social Change 2020”, 2020, vol. 150, s. 1–9.
- [13] [13] Cao W., Jiang P., Lu P., Liu B., Jiang K., *Real-time data-driven monitoring in job-shop floor based on radio frequency identification*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2017, 92, no 5–8, s. 2099–2120.

- [14] Cavalieri S., Salafia M. G., Scropo M. S., *Towards interoperability between OPC UA and OCF*, „Journal of Industrial Information Integration”, 2019, 15, s. 122–137.
- [15] Cechowicz R., Stączek P., Płaska S., *Dynamiczne szeregowanie zadań w warsztacie produkcyjnym*, „Folia Societatis Scientiarum Lublinensis”, 1998, 7, s. 118–124.
- [16] Chlebus E., *Technika komputerowa CAX w inżynierii produkcji*, Poznań, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [17] Cormen T. H., Diks K. T., *Wprowadzenie do algorytmów*. Wyd. 7, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [18] Ćwikła G., *Methods of Manufacturing Data Acquisition for Production Management – A Review*, „Advanced Materials Research”, 2014, 837, s. 618–623.
- [19] Ćwikła G., *Manufacturing data acquisition in non-automated production systems*, „Systems Supporting Production Engineering”, 2013, vol. 1(3), s. 63–76.
- [20] Daniewski K., Kosicka E., Mazurkiewicz D., *Analysis of the Correctness of Determination of the Effectiveness of Maintenance Service Actions*, „Management & Production Engineering Review (MPER)”, 2018, vol. 9, no 2, s. 20–25.
- [21] Dau A., Keogh E., *Matrix Profile V: A Generic Technique to Incorporate Domain Knowledge into Motif Discovery*, 23<sup>rd</sup> ACM SIGKDD International Conference, 2017, s. 125–134.
- [22] Davis J., Edgar T., Porter J., Bernaden J., Sarli M., *Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance*, „Computers and Chemical Engineering”, 2012, vol. 47, s. 145–156.
- [23] Dębowski A., *Automatyka Podstawy teorii*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.
- [24] Demetrescu C., Italiano G. F., *Maintaining dynamic matrices for fully dynamic transitive closure*, „Algorithmica”, 2008, vol. 51, no 4, s. 387–427.
- [25] Díaz M., Martín C., Rubio B., *State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing*, „Journal of Network and Computer Applications”, 2016, vol. 67, no C, s. 99–117.
- [26] Edrington B., Zhao B., Hansel A., Mori M., Fujishima M., *Machine monitoring system based on MTConnect technology*, „Procedia CIRP”, 2014, vol. 22, no 1, s. 92–97.
- [27] Fore G., Detail C. A., *Predictive Maintenance Case Study, Vibration Data (Gear Mesh) Case Study*, 2018, 19701, s. 1–17.
- [28] Garetti M., Fumagalli L., Negri E., *Role of Ontologies for CPS Implementation in Manufacturing*, „Management and Production Engineering Review”, 2015, vol. 6, no 4, s. 26–32.

- [29] Gola A., Nieoczym A., *Application of OEE Coefficient for Manufacturing Lines Reliability Improvement*, [w:] *International Conference on Management Science and Management Innovation (MSMI 2017)*, 2017, t. 31, s. 189–194.
- [30] Gribaudo M., Iacono M., Kiran M., *A performance modeling framework for lambda architecture based applications*, „Future Generation Computer Systems”, 2018, vol. 86, s. 1032–1041.
- [31] Griffor E. R., Greer C., Wollman D. A., Burns M. J., *Framework for Cyber-Physical Systems : Volume 2*, Working Group Reports, NIST Special Publication 1500-202, 2017, 2.
- [32] Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M., *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*, „Future Generation Computer Systems”, 2013, vol. 29, no 7, s. 1645–1660.
- [33] Gurjanov A. V., Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., *The description of the Industry 4.0 cyber and physical production division based on Petri net models*, „Journal of Physics: Conference Series”, 2018, 1050, no 1, s. 1–6.
- [34] Haag S., Anderl R., *Digital twin – Proof of concept*, „Manufacturing Letters”, 2018, 15, s. 64–66.
- [35] Habela P., *Metodyki zarządzania projektem*, Warszawa, Wydawnictwo Polsko-Japońskiej Wyższej Szkoły Technik Komputerowych, 2011.
- [36] Hamrol A., *Zarządzanie i inżynieria jakości*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [37] Hibbard S., Harrington P., Norris B., Resnick R., Roland C., Sanders R., Sheehan T., Walter J., Watts D., *Production equipment availability A Measurement Guideline*, Wyd. 4, AMT – The Association For Manufacturing Technology, 2011.
- [38] Iwasiewicz A., Paszek Z., *Statystyka z elementami statystycznych metod monitorowania procesów*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, 2004.
- [39] Jasiulewicz-Kaczmarek M., Gola A., *Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing – an Overview*, „IFAC-PapersOnLine”, 2019, vol. 52, no 10, s. 91–96.
- [40] Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D., *Industrial Internet of Things Cybermanufacturing Systems*, Springer International Publishing, 2017.
- [41] Jimmy L., *The Lambda and the Kappa*, „IEEE Internet Computing”, 2017, vol. 21, no 5, s. 60–66.
- [42] Jonek-Kowalska I., Tchórzewski S., *Wskaźniki efektywności wykorzystania maszyn i urządzeń w górnictwie węgla kamiennego – krytyczne podejście do unifikacji i normalizacji*, „Inżynieria Mineralna”, 2016, 17, nr 2, s. 99–105.

- [43] Kaitovic I., Lukovic S., Małek M., *Proactive failure management in smart grids for improved resilience: A methodology for failure prediction and mitigation*, [w:] *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2015 – Proceedings*, 2015, s. 1–6.
- [44] Karczmarz A., *Data Structures and Dynamic Algorithms for Planar Graphs*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Warszawski, Instytut Informatyki, 2018.
- [45] Karpiński T., *Inżynieria produkcji*, Warszawa, Wydawnictwa WNT, 2015.
- [46] Kejariwal A., Orsini F., *On the Definition of Real-Time: Applications and Systems*, *IEEE Trustcom/ BigDataSE/ ISPA*, 2016, s. 2213–2220.
- [47] Koliński A., *Przegląd metod i technik oceny efektywności procesu produkcyjnego*, „Logistyka”, 2011, nr 5, s. 1083–1091.
- [48] Kotarbiński T., *Traktat o dobrej robocie*. Wyd. 4, Warszawa, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1969.
- [49] Kozłowski E., *Analiza i identyfikacja szeregów czasowych*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2015.
- [50] Krasoń P., *Wykorzystanie wskaźnika OEE w koncepcji kompleksowego utrzymania ruchu*, „Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie” Politechnika Łódzka, 2016, nr 66, s. 29–43.
- [51] Krysiak M., Głownia S., *Metodyki Zarządzania Projektami IT i ich ryzykiem: Przegląd i Wykorzystanie*, „Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, 2017, nr 340, s. 79–98.
- [52] Krystek J., *Zintegrowany przepływ informacji w systemie produkcyjnym Integrated flow of information in the production system*, „Mechanik”, 2016, nr 7, s. 721–723.
- [53] Kumar M., Vaishya R., Parag, *Real-Time Monitoring System to Lean Manufacturing*, „Procedia Manufacturing”, 2018, vol. 20, s. 135–140.
- [54] Kuźniarska A., Stańczyk I., *Wybrane wskaźniki efektywności przedsiębiorstw w obszarze ZZL na przykładzie firm z WIG 30*, „Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach”, 2017 nr 328, s. 147–162.
- [55] Lal K., Rak T., Orkisz K., *RTLinux - system czasu rzeczywistego*. Gliwice, Wydawnictwo Helion, 2003.
- [56] Lam H. T., Pham N. D., Calders T., *Online discovery of top-k similar motifs in time series data*, [w:] *Proceedings of the 11th SIAM International Conference on Data Mining, SDM 2011*, s. 1004–1015.
- [57] Landryová L., Zolotová I., Landryova L., Zolotova I., *OEE Monitoring for Production Processes Based on SCADA/HMI Platform*, [w:] *Advances in Production Management Systems*, 2007, s. 189–196.
- [58] Laney D., *Application Delivery Strategies*, Gartner Meta Delta Group, 2001.

- [59] Lee E. A., „*Cyber Physical Systems: Design Challenges*”, [w:] *11<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008, s. 363–369.
- [60] Lee J., Bagheri B., Kao H.-A., *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*, „*Manufacturing Letters*”, 2015, vol. 3, s. 18–23.
- [61] Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V., *Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based Manufacturing Systems*, *Manufacturing Letters*, 2018, s. 20–23.
- [62] Lee J., Kao H. A., Yang S., *Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment*, „*Procedia CIRP*”, 2014, vol. 16, s. 3–8.
- [63] Lee J., Singh J., Azamfar M., *Industrial Artificial Intelligence*, „arXiv:1908.02150”, 2019.
- [64] Li J., Tao F., Cheng Y., Zhao L., *Big Data in product lifecycle management*, „*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*”, 2015, vol. 81, no 1–4, s. 667–684.
- [65] Li Z., Wang K., He Y., *Industry 4.0-Potentials for Predictive Maintenance*, [W:] *6<sup>th</sup> International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, 2016, s. 42–46.
- [66] Lin S. W., Miller B., Durand J., Bleakley G., Chigani A., Martin R., Murphy B., Crawford M., *The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture*, Industrial Internet Consortium, 2017.
- [67] Lipski J., *Diagnostyka procesów wytwarzania*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2013.
- [68] Lipski J., *Internet rzeczy w zastosowaniu do sterowania produkcją*, [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*. T. 2, Oficyna Wydawnicza Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, 2015, s. 755–766.
- [69] Liu C., Vengayil H., Lu Y., Xu X., *A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect*, „*Journal of Manufacturing Systems*”, 2019, vol. 51, s. 61–74.
- [70] Maciąg A., Pietroń R., *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*. Warszawa, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A., 2013.
- [71] Marrón D., Read J., Bifet A., Navarro N., *Data stream classification using random feature functions and novel method combinations*, „*Journal of Systems and Software*”, 2017, vol. 127, s. 195–204.
- [72] Meissner H., Ilsen R., Aurich J. C., *Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0*, *Procedia CIRP*, 2017, s. 359 – 364.
- [73] Mell P., Grance T., *The NIST Definition of Cloud Computing Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*, National Institute of Standards and Technology, Information Technology Laboratory, 2011, vol. 145, s. 7.

- [74] Michalski P., *Collecting data from industrial sensors in case of 4-th industrial revolution*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 400, no 062019, 2018, s. 1–6.
- [75] Miller M., *Internet rzeczy*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016.
- [76] Monostori L., *Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges*, „Procedia CIRP”, 2014, vol. 17, s. 9–13.
- [77] Mourtzis D., Vlachou E., Milas N., *Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing*, „Procedia CIRP”, 2016, t. 55, s. 290–295.
- [78] Mueen A., Keogh E., *Online discovery and maintenance of time series motifs*, [w:] *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2010, s. 1089–1098.
- [79] Muryjas P., Cieplak T., *Chmura obliczeniowa jako innowacyjne narzędzie IT wspomagania procesów logistycznych*, „Logistyka”, 2015, nr 4, s. 5003–5012.
- [80] Olaniyan R., Fadahunsi O., Maheswaran M., Zhani M., *Opportunistic Edge Computing: Concepts, opportunities and research challenges*, „Future Generation Computer Systems”, 2018, vol. 89, s. 633–645.
- [81] Pająk E., Klimkiewicz M., Kosieradzka A., *Zarządzanie produkcją i usługami*, Warszawa, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A., 2014.
- [82] Pandey S., Nakra B., *Vibration Monitoring of a Rotor System using RMS Accelerations (m/s<sup>2</sup>)*, „International Journal of Engineering Science and technology”, 2011, 3, no 4, s. 2559–2572.
- [83] Pawlak M., *Zarządzanie projektami*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2006.
- [84] Pawłowski E., Pawłowski K., Trzecieliński S., *Metody i narzędzia Lean Manufacturing*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010.
- [85] Pizoń J., *Współczesne kierunki rozwoju systemów inteligentnego wytwarzania – Smart Manufacturing*, [w:] *Postępy w naukach technicznych i informatycznych oraz współczesne metody nauczania*, Lublin, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o. o., 2016, s. 229–240.
- [86] Pizoń J., *Koncepcja wdrożenia technologii „Internetu rzeczy” w systemie logistycznym przedsiębiorstwa*, „Systemy Logistyczne Wojsk”, 2015, nr 43, s. 120–136.
- [87] Pizoń J., Cieplak T., *Analiza i monitorowanie danych produkcyjnych z wykorzystaniem strumieniowego przetwarzania danych*, [w:] *Aplikacyjne metody obliczeniowe oraz zarządzanie danymi*, Lublin, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o., 2017, s. 91–99.
- [88] Pizoń J., Lipski J., *Sztuczna inteligencja w inżynierii produkcji*, [w:] *Innowacyjne metody w inżynierii produkcji*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2014, s. 11–24.
- [89] Pizoń J., Lipski J., *Manufacturing Process Support Using Artificial Intelligence*, „Applied Mechanics and Materials”, 2015, 791, s. 89–95.

- [90] Pizoń J., Lipski J., *Perspectives for fog computing in manufacturing*, „Applied Computer Science”, 2016, 12, no 3, s. 37–46.
- [91] Pizoń J., Lipski J. A., Cieplak T., *Koncepcja modelu wyceny wartości strumienia danych produkcyjnych*, [w:] *Komputerowo wspomagane projektowanie procesów: aktualne zagadnienia badawcze*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2017, s. 68–80.
- [92] Pizoń J., Lipski J., Cieplak T., *Etapy analizy danych produkcyjnych w chmurze obliczeniowej z wykorzystaniem języka R*. Opole, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2017, s. 762–772.
- [93] Podgórecki A., *Zasady socjotechniki*. Warszawa, Wiedza Powszechna, 1966.
- [94] Pyszka A., *Istota efektywności. Definicje i wymiary*, *Studia Ekonomiczne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, 2015, 230, s. 13–25.
- [95] Qi Q., Tao F., Zuo Y., Zhao D., *Digital Twin Service towards Smart Manufacturing*, 2018, „Procedia CIRP”, vol. 72, s. 237–242.
- [96] Rogers M. J. B., Hrovat K., Mcpherson K., Moskowitz M. E., Reckart T., *Accelerometer Data Analysis and Presentation Techniques*, Ohio, National Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center, 1997.
- [97] Rogowski A., *Podstawy organizacji i zarządzania produkcją w przedsiębiorstwie*. Warszawa, CeDeWu Sp. z o.o., 2010.
- [98] Sanders A., Elangeswaran C., Wulfsberg J., *Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing*, „Journal of Industrial Engineering and Management”, 2016, vol. 9, no 3, s. 811–833.
- [99] Santarek K., Knosala R., *Inżynieria produkcji: kompendium wiedzy*, Warszawa, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2017.
- [100] Savolainen T., *Software integration technologies in CIM*, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1990.
- [101] Schutt Rachel O. C., *Doing Data Science*, Sebastopol, O'Reilly Media, 2014.
- [102] Skrzypek E., *Efektywność ekonomiczna jako ważny czynnik sukcesu organizacji*, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 2012, nr 262, s. 313–325.
- [103] Szatkowski K., *Nowoczesne zarządzanie produkcją Ujęcie procesowe*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 2014.
- [104] Szczubełek G., *Zintegrowane systemy wytwarzania*, Olsztyn, EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, sp.j., 2014.
- [105] Szeliga M., *Data Science i uczenie maszynowe*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2017.
- [106] Tadeusz M., *Eksploracja danych*, Wyd. I, Warszawa, PWN SA, 2013.

- [107] Talhi A., Huet J. C., Fortineau V., Lamouri S., *Towards a cloud manufacturing systems modeling methodology*, „IFAC-PapersOnLine”, 2015, vol. 28, no 3, s. 288–293.
- [108] Trocki M., *Nowoczesne zarządzanie projektami*, Warszawa, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne S.A., 2012.
- [109] Trojanowska J., Kolinski A., Varela M. L. R., Machado J., *The use of theory of constraints to improve production efficiency – Industrial practice and research results*, [w:] 24<sup>th</sup> International Conference on Production Research (ICPR 2017), 2017.
- [110] Wang J., Liu C., Zhu M., Guo P., Hu Y., *Sensor Data Based System-Level Anomaly Prediction for Smart Manufacturing*, [w:] IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress), 2018, s. 158–165.
- [111] Wei M., Chen M., Zhou D., *Multi-sensor monitoring information based decision support method for optimal predictive maintenance policy*, [w:] 25<sup>th</sup> Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013, s. 4864–4868.
- [112] Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D., *Towards Industry 4.0 Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems*, „IFAC-PapersOnLine”, 2015, 48, no 3, s. 579–584.
- [113] Winkler R., *Efektywność-próba konceptualizacji pojęcia*, „Zeszyty Naukowe nr 820 Uniwersytet Ekonomicznego w Krakowie”, 2010.
- [114] Yeh M., Yan Z., Ulanova L., Begum N., Ding Y., Anh Dau H., Furtado Silva D., Mueen A., Keogh E., *Matrix Profile I: All Pairs Similarity Joins for Time Series: A Unifying View that Includes Motifs, Discords and Shapelets*, [w:] IEEE 16<sup>th</sup> International Conference on Data Mining (ICDM), 2016.
- [115] Yu C., Xu X., Lu Y., *Computer-Integrated Manufacturing, Cyber-Physical Systems and Cloud Manufacturing – Concepts and relationships*, „Manufacturing Letters”, 2015, 6, s. 5–9.
- [116] Zawadzka L., Badurek J., Łopatowska J., *Inteligentne systemy produkcyjne Algorytmy koncepcje zastosowania*, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2012.
- [117] Zhu L., Johnsson C., Varisco M., Schiraldi M. M., *Key performance indicators for manufacturing operations management – Gap analysis between process industrial needs and ISO 22400 standard*, „Procedia Manufacturing”, 2018, vol. 25, s. 82–88.
- [118] Zhu Y., Imamura M., Nikovski D., Keogh E., *Time series chains: A novel tool for time series data mining*, [w:] IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2018, s. 5414–5418.
- [119] Zieliński T., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2013.

- [120] „Six Big Losses – TPM, OEE, and Improving Productivity | OEE”, [Online:] <https://www.oee.com/oee-six-big-losses.html>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [121] „Beacon | device | Britannica.com”, [Online:] <https://www.britannica.com/technology/beacon-device>. [Dostęp: 29-paź-2018].
- [122] „Lambda architecture – how to build a Big data pipeline part 1”, Towards Data Science, 2019. [Online:] <https://towardsdatascience.com/lambda-architecture-how-to-build-a-big-data-pipeline-part-1-8b56075e83fe>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [123] „Architektura Big Data – Lambda i Kappa”, Business Intelligence ERP-VIEW.PL, 2017. [Online:] <https://www.erp-view.pl/artykuly-business-intelligence/26031-architektura-big-data-lambda-i-kappa.html>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [124] „Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016”, 2017. [Online:] <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-07-gartner-says-8-billion-connected-things-will-be-in-use-in-2017-up-31-percent-from-2016>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [125] „10 Charts That Will Challenge Your Perspective Of IoT's Growth”, [Online:] <https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2018/06/06/10-charts-that-will-challenge-your-perspective-of-iots-growth/#72a20f513ecc>. [Dostęp: 30-paź-2018].
- [126] „Polska produkcja gotowa na Przemysł 4.0?”, [Online:] <https://www.psi.pl/pl/blog/psi-polska-blog/post/polska-produkcja-gotowana-przemysl-40/>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [127] „Raport Smart Industry Polska 2019”, [Online:] <https://publikacje.siemens-info.com/ebook/554/raport-smart-industry-polska-2019>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [128] „Przemysł 4.0 w Polsce: brakuje strategii i liderów”, [Online:] <https://new.abb.com/news/pl/detail/26874/przemysl-40-w-polsce-brakuje-strategii-i-liderow>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [129] „Analiza szeregów czasowych”, StatSoft Electronic Statistic Textbook. [Online:] [https://www.statsoft.pl/textbook/stathome\\_stat.html?https%3A%2F%2Fwww.statsoft.pl%2Ftextbook%2Fstimser.html](https://www.statsoft.pl/textbook/stathome_stat.html?https%3A%2F%2Fwww.statsoft.pl%2Ftextbook%2Fstimser.html). [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [130] „Główny Urząd Statystyczny / Metainformacje / Szeregi czasowe”, [Online:] <https://stat.gov.pl/metainformacje/szeregi-czasowe-4712/>. [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [131] „Definition: data stream”, [Online:] [https://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-010/\\_1451.htm](https://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-010/_1451.htm). [Dostęp: 28-grudz-2019].
- [132] „What is a Data Stream? – Definition from Techopedia”, [Online:] <https://www.techopedia.com/definition/6757/data-stream>. [Dostęp: 28-grudz-2019].

- [133] „Dane dynamiczne | INTRALOG – automatyka magazynowa, przenośniki, intralogistyka”, [Online:] <http://www.intralog.pl/pl/dane-dynamiczne/>. [Dostęp: 19-sty-2020].
- [134] „*Introduction to Matrix Profiles - Towards Data Science*”, [Online:] <https://towardsdatascience.com/introduction-to-matrix-profiles-5568f3375d90>. [Dostęp: 28-grud-2019].
- [135] „*Mikron UCP 800 Duro - GF Machining Solutions from France - Milling, EDM, Laser and Automation*”, [Online:] [https://www.gfms.com/country\\_FR/en/Products/Milling/high-performance-machining-centers/ucp--universal-high-performance-machining-centers/mikron-ucp-800-duro.html](https://www.gfms.com/country_FR/en/Products/Milling/high-performance-machining-centers/ucp--universal-high-performance-machining-centers/mikron-ucp-800-duro.html). [Dostęp: 25-kwi-2019].
- [136] „*Tokarka uniwersalna CNC TUR 560/630/630A/710/710A MN kupić w Wrocław*”, [Online:] <https://pl.all.biz/tokarka-uniwersalna-cnc-tur-560630630a710710a-mn-g2241>. [Dostęp: 25-kwi-2019].
- [137] „*Tokarki numeryczne TUR MN 560/630/710*”, [Online:] <https://www.haco.com/upload/attach-image/tur-mn-560-630-710pdf-3-1.pdf>. [Dostęp: 25-kwi-2019].
- [138] „*CC2650STK SimpleLink™ Bluetooth low energy/Multi-standard SensorTag | TI.com*”, [Online:] <http://www.ti.com/tool/CC2650STK#3>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [139] „*TI Designs Multi-Standard CC2650 SensorTag Design Guide*”, 2015. [Online:] <http://www.ti.com/product>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [140] „*MPU-9250 Product Specification Revision 1.1 MPU-9250 Product Specification*”, [Online:] <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. [Dostęp: 10-kwi-2019].
- [141] „*Project Jupyter | Home*”, [Online:] <https://jupyter.org/>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [142] „*RStudio*”, [Online:] <https://www.rstudio.com/products/rstudio/>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [143] „*The Comprehensive R Archive Network*”, [Online:] <https://cran.r-project.org/>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [144] „*Python Data Analysis Library — pandas: Python Data Analysis Library*”, [Online:] <https://pandas.pydata.org/>. [Dostęp: 26-kwi-2019].
- [145] „*NumPy*”, [Online:] <https://www.numpy.org/>. [Dostęp: 26-kwi-2019].

## Spis rysunków

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rys. 1. Struktura procesu produkcyjnego i wytwórczego.....                                       | 17 |
| Rys. 2. Uogólniony model systemu produkcyjnego .....                                             | 18 |
| Rys. 3. Przykłady realizacyjnych koncepcji systemów wytwarzania .....                            | 19 |
| Rys. 4. Czynniki determinujące rozwój systemów wytwarzania .....                                 | 21 |
| Rys. 5. Struktura OEE i straty.....                                                              | 27 |
| Rys. 6. Strategie utrzymania a złożoność i wartość .....                                         | 31 |
| Rys. 7. Model wsparcia systemu wytwarzania przez system informatyczny .....                      | 33 |
| Rys. 8. Ogólna architektura systemów IIoT .....                                                  | 35 |
| Rys. 9. Przemysłowy wielowymiarowy zbiór danych generowany<br>z wykorzystaniem IIoT .....        | 37 |
| Rys. 10. Chmura obliczeniowa a IoT.....                                                          | 40 |
| Rys. 11. Zastosowanie mgły obliczeniowej.....                                                    | 40 |
| Rys. 12. Architektura przetwarzania chmura i mgła obliczeniowa .....                             | 41 |
| Rys. 13. Architektura Lambda .....                                                               | 42 |
| Rys. 14. Architektura Kappa.....                                                                 | 43 |
| Rys. 15. Cyfrowy bliźniak .....                                                                  | 44 |
| Rys. 16. Cztery etapy rewolucji przemysłowej.....                                                | 46 |
| Rys. 17. Rozwiązanie przemysł 4.0 .....                                                          | 47 |
| Rys. 18. Ewolucja przełomowych technologii w produkcji .....                                     | 47 |
| Rys. 19. Schemat działania systemu czasu rzeczywistego klasy Przemysł 4.0 ..                     | 51 |
| Rys. 20. Koncepcja CIM.....                                                                      | 52 |
| Rys. 21. Przemysł 4.0 a CIM .....                                                                | 53 |
| Rys. 22. Metodyka CRISP-DM .....                                                                 | 57 |
| Rys. 23. Scenariusz pozyskiwania danych.....                                                     | 62 |
| Rys. 24. Wyspy danych .....                                                                      | 62 |
| Rys. 25. Profil macierzowy $P$ szeregu czasowego zużycia energii $T$ oraz<br>zapytania $Q$ ..... | 71 |
| Rys. 26. Charakterystyka struktury profilu macierzy odległości.....                              | 73 |
| Rys. 27. Sposób identyfikacji wzorców.....                                                       | 73 |
| Rys. 28. Zaburzenia ilustrowane jako punkty odstające.....                                       | 74 |
| Rys. 29. Łącuchów wzorców szeregu czasowego .....                                                | 74 |
| Rys. 30. Ciśnienie tętnicze osoby dorosłej i łańcuch wzorców szeregu<br>czasowego .....          | 75 |
| Rys. 31. Wyodrębniony przykładowy łańcuch wzorów .....                                           | 76 |
| Rys. 32. Obliczanie odległości dla danej sekwencji .....                                         | 78 |
| Rys. 33. Wybór pod sekwencji o najbliższej odległości.....                                       | 78 |
| Rys. 34. Obliczenie profilu macierzowego .....                                                   | 79 |
| Rys. 35. Poglądowy schemat docelowego rozwiązania.....                                           | 85 |
| Rys. 36. Schemat stanowiska badawczego .....                                                     | 89 |
| Rys. 37. Języki wysokiego poziomu.....                                                           | 90 |

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 38. Centrum frezarskie MIKRON UCP 800 DURO .....                                                                                                                    | 90  |
| Rys. 39. Tokarka CNC TUR MN 560x200 .....                                                                                                                                | 91  |
| Rys. 40. Sensor Tag CC2650 .....                                                                                                                                         | 92  |
| Rys. 41. Modyfikacją zasilania czujnika .....                                                                                                                            | 93  |
| Rys. 42. Orientacja osi akcelerometru .....                                                                                                                              | 94  |
| Rys. 43. Pozycja czujnika – tokarka .....                                                                                                                                | 95  |
| Rys. 44. Pozycja czujnika – centrum frezarskie .....                                                                                                                     | 95  |
| Rys. 45. Zamontowane i zabezpieczone czujniki .....                                                                                                                      | 96  |
| Rys. 46. Lokalizacja komputera agregującego dane czujnika dla frezarki .....                                                                                             | 96  |
| Rys. 47. Schemat realizacji strumienia danych za pomocą Node-Red .....                                                                                                   | 97  |
| Rys. 48. Ekran startowy pakietu Anaconda .....                                                                                                                           | 98  |
| Rys. 49. Zarejestrowany przykładowy szereg czasowy .....                                                                                                                 | 99  |
| Rys. 50. Wykres wartości RMS .....                                                                                                                                       | 104 |
| Rys. 51. Wykres RMS po zastosowaniu minutowej średniej kroczącej .....                                                                                                   | 105 |
| Rys. 52. Wykres RMS – godzinny .....                                                                                                                                     | 105 |
| Rys. 53. Wykres RMS – godzinny po zastosowaniu minutowej średniej<br>kroczącej .....                                                                                     | 106 |
| Rys. 54. Dekompozycja RMS .....                                                                                                                                          | 106 |
| Rys. 55. Dekompozycja RMS dla próbki po zastosowaniu minutowej<br>średniej kroczącej .....                                                                               | 107 |
| Rys. 56. Składowa okresowa dla RMS .....                                                                                                                                 | 107 |
| Rys. 57. Profil macierzy próbki szeregu czasowego .....                                                                                                                  | 109 |
| Rys. 58. Zidentyfikowany wzorzec .....                                                                                                                                   | 109 |
| Rys. 59. Zidentyfikowany łańcuch wzorców .....                                                                                                                           | 110 |
| Rys. 60. Zidentyfikowane zaburzenie .....                                                                                                                                | 111 |
| Rys. 61. Przetwarzania danych przez algorytm dynamiczny .....                                                                                                            | 113 |
| Rys. 62. Realizacja cyfrowego sprzężenia zwrotnego .....                                                                                                                 | 113 |
| Rys. 63. Algorytm dynamiczny wyznaczenia rzeczywistego całkowitego<br>czasu procesu technologicznego dla obróbki części .....                                            | 115 |
| Rys. 64. Algorytm dynamiczny wyznaczania wskaźnika efektywności danej<br>maszyny .....                                                                                   | 117 |
| Rys. 65. Schemat działania algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu<br>wystąpienia zaburzenia .....                                                                      | 119 |
| Rys. 66. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia<br>rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla<br>obróbki części dla próbki nr 15 ..... | 122 |
| Rys. 67. Wyniki końcowe dla rzeczywistego całkowitego czasu obróbki<br>dla wszystkich próbek dla frezarki .....                                                          | 124 |
| Rys. 68. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia<br>rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego<br>dla obróbki części dla próbki nr 10 ..... | 124 |
| Rys. 69. Wyniki końcowe dla rzeczywistego całkowitego czasu obróbki<br>dla wszystkich próbek dla tokarki .....                                                           | 125 |

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 70. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczania<br>wskaźnika efektywności danej dla próbki nr 15.....                             | 126 |
| Rys. 71. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania<br>wskaźnika efektywności danej maszyny dla wszystkich próbek<br>dla frezarki..... | 127 |
| Rys. 72. Wynik otrzymane dla algorytmu dynamicznego wyznaczania<br>wskaźnika efektywności danej dla próbki nr 10.....                             | 128 |
| Rys. 73. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania<br>wskaźnika efektywności danej maszyny dla wszystkich próbek<br>dla tokarki.....  | 129 |
| Rys. 74. Wynik otrzymany dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu<br>wystąpienia zaburzenia dla próbki nr 15 .....                            | 129 |
| Rys. 75. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu<br>wystąpienia zaburzenia dla frezarki .....                                 | 131 |
| Rys. 76. Wynik otrzymany dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu<br>wystąpienia zaburzenia dla próbki nr 10 .....                            | 131 |
| Rys. 77. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu<br>wystąpienia zaburzenia dla tokarki .....                                  | 132 |
| Rys. 78. Ścieżka najlepszej efektywności.....                                                                                                     | 136 |
| Rys. 79. Etapy opracowanej metodyki .....                                                                                                         | 139 |
| Rys. 80. Przykładowe interfejsy strony www i aplikacji mobilnej<br>prezentujące wyniki rozwiązania.....                                           | 145 |

## Spis tabel

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1. Straty w kategoriach OEE .....                                                                                                                                             | 28  |
| Tabela 2. Klasyczne a zwinne podejście.....                                                                                                                                          | 55  |
| Tabela 3. Specyfikacja techniczna centrum frezarskiego .....                                                                                                                         | 91  |
| Tabela 4. Specyfikacja techniczna tokarki.....                                                                                                                                       | 92  |
| Tabela 5. Specyfikacja techniczna Sensor Tag CC2650.....                                                                                                                             | 93  |
| Tabela 6. Zarejestrowane dane – podsumowanie .....                                                                                                                                   | 102 |
| Tabela 7. Zarejestrowane dane – frezarka .....                                                                                                                                       | 103 |
| Tabela 8. Zarejestrowane dane – tokarka.....                                                                                                                                         | 103 |
| Tabela 9. Specyfikacja algorytmu dynamicznego wyznaczania całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części .....                                                        | 116 |
| Tabela 10. Specyfikacja algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny .....                                                                                | 118 |
| Tabela 11. Specyfikacja algorytmu dynamicznego wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia .....                                                                                        | 120 |
| Tabela 12. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części dla frezarki..... | 123 |
| Tabela 13. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczenia rzeczywistego całkowitego czasu procesu technologicznego dla obróbki części dla tokarki.....  | 125 |
| Tabela 14. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny dla frezarki .....                                       | 127 |
| Tabela 15. Wyniki końcowe dla wszystkich próbek dla algorytmu dynamicznego wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny dla tokarki .....                                        | 128 |
| Tabela 16. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania czasu wystąpienia zaburzenia dla danych frezarki .....                                                              | 130 |
| Tabela 17. Wyniki końcowe dla algorytmu dynamicznego wyznaczania czasu wystąpienia zaburzenia dla danych tokarki.....                                                                | 132 |

## Spis list

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Lista 1. Zestawienie połączenia z czujnikiem.....                                    | 97  |
| Lista 2. Charakterystyka próbki nr 15.....                                           | 104 |
| Lista 3. Generowanie profilu .....                                                   | 108 |
| Lista 4. Identyfikacja wzorców .....                                                 | 109 |
| Lista 5. Indeksy zidentyfikowanych wzorców.....                                      | 110 |
| Lista 6. Identyfikacja łańcuchów wzorców.....                                        | 110 |
| Lista 7. Indeks zidentyfikowanego łańcucha motywów .....                             | 111 |
| Lista 8. Identyfikacja zaburzeń .....                                                | 111 |
| Lista 9. Indeksy zidentyfikowanych zaburzeń.....                                     | 112 |
| Lista 10. Obliczenie czasu wystąpienia anomalii .....                                | 120 |
| Lista 11. Obliczenia profilu macierzy odległości przy pomocy algorytmu<br>STOMP..... | 121 |

# Załączniki

## Załącznik nr 1

### Przygotowanie i czyszczenie danych

Poniżej zawarty został opis przygotowania próbki danych

#### Słownik stosowanych skrótów:

df\_maszyny – ramka danych zawierająca załadowane dane doświadczalne z danego okresu danej maszyny

### Import bibliotek przetwarzania danych

Niniejsze biblioteki pozwalają na przetwarzanie załadowanych danych. Dzięki funkcjonalnościom przez nie dostarczanym możliwe są transformacje danych pozwalające na zmianę ich typu, usunięcie braków danych i zobrazowanie danych w formie wykresów.

```
import pandas as pd
from datetime import datetime
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
```

### Załadowanie danych

Dane ładowane są z plików tekstowych.

```
df_maszyny = pd.read_csv('C:\\Users\\Jakub\\Documents\\Dane\\Dro
pbox_data\\sensorData2Tokarka\\ST2_log_acce.txt', header=None)
df_maszyny.head()
```

|   | 0                        | 1                 | 2       | 3   |
|---|--------------------------|-------------------|---------|-----|
| 0 | 2018-11-29T09:39:28.016Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarka | NaN |
| 1 | 2018-11-29T09:39:28.070Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarka | NaN |

### Wyświetlenie informacji na temat próbki

Podstawowe informacje na temat liczebności próbki, liczby pól oraz typów danych.

```
df_maszyny.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 890139 entries, 0 to 890138
Data columns (total 4 columns):
0 890138 non-null object
1 890139 non-null object
2 890139 non-null object
3 445067 non-null object
dtypes: object(4)
memory usage: 27.2+ MB
```

## Selekcja rekordów

Przedmiotem badań doświadczalnych są dane akcelerometru. W procesie badań pozyskiwano też dane z żyroskopu jak i magnetometru – nie będące przedmiotem niniejszych badań.

```
df_maszyny=df_maszyny[df_maszyny[2] == 'tokarka']
df_maszyny.head()
```

|   | 0                        | 1                 | 2              | 3 |
|---|--------------------------|-------------------|----------------|---|
| 0 | 2018-11-29T09:39:28.016Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN     |   |
| 1 | 2018-11-29T09:39:28.070Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN     |   |
| 2 | 2018-11-29T09:39:28.084Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN     |   |
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarka[0,0,0] |   |
| 4 | 2018-11-29T09:39:28.875Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN     |   |

## Usunięcie niepotrzebnych meta danych

Dane doświadczalne zapisywane były wraz metadanymi opisującymi miejsce powstania tychże danych.

```
df_maszyny=df_maszyny.drop(columns=[1,2])
```

## Wyświetlenie całej długości wiersza

Wartości pól agregowanych danych niejednokrotnie przekraczały standardowy wymiar kolumny.

```
pd.set_option('display.max_colwidth', -1)
df_maszyny.head(1)
```

|   | 0                        | 1                 | 2          | 3 |
|---|--------------------------|-------------------|------------|---|
| 0 | 2018-11-29T09:39:28.016Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN |   |
| 1 | 2018-11-29T09:39:28.070Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN |   |
| 2 | 2018-11-29T09:39:28.084Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN |   |

|   |                          |                   |                |
|---|--------------------------|-------------------|----------------|
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarka[0,0,0] |
| 4 | 2018-11-29T09:39:28.875Z | 54:6c:0e:79:61:86 | tokarkaNaN     |

### Nadanie nowych nazw kolumnom

W celu dalszej analizy nadano nowe nazwy kolumnom.

```
df_maszyny.columns = ['czas', 'xyz']
df_maszyny.head(1)
```

|   | czas                     | xyz |
|---|--------------------------|-----|
| 0 | 2018-11-29T09:39:28.016Z | NaN |

### Usunięcie braków danych

Funkcja frameworka pandas .dropna pozwala na usunięcie braków z ramki danych.

```
df_maszyny.dropna(inplace=True)
df_maszyny.head()
```

|   | czas                     | xyz                                        |
|---|--------------------------|--------------------------------------------|
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z | [0,0,0]                                    |
| 5 | 2018-11-29T09:39:29.168Z | [0,0,0]                                    |
| 7 | 2018-11-29T09:39:29.559Z | [0,0,0]                                    |
| 9 | 2018-11-29T09:39:29.948Z | [-0.3115234375,0.62646484375,2.2919921875] |

### Usunięcie dodatkowych niepotrzebnych znaków

Serie posiadają niepotrzebne znaki, które uniemożliwiają dalsze przetwarzanie. Konieczne jest ich usunięcie.

```
df_maszyny.xyz=df_maszyny.xyz.str[1:-1]
df_maszyny.head()
```

|   | czas                     | xyz                                      |
|---|--------------------------|------------------------------------------|
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z | 0,0,0                                    |
| 5 | 2018-11-29T09:39:29.168Z | 0,0,0                                    |
| 7 | 2018-11-29T09:39:29.559Z | 0,0,0                                    |
| 9 | 2018-11-29T09:39:29.948Z | -0.3115234375,0.62646484375,2.2919921875 |

### Podział strumienia danych xyz na poszczególne serie x, y, z

Z serii xyz wyodrębnione zostaną poszczególne serie danych x, y, z.

```
df_maszyny[['x','y','z']]=df_maszyny.xyz.str.split(',',expand=True)
df_maszyny.head(1)
```

|   | czas                     | xyz   | x | y | z |
|---|--------------------------|-------|---|---|---|
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z | 0,0,0 | 0 | 0 | 0 |

## Usunięcie nadmiarowej kolumny strumienia danych xyz i wyświetl dane zawarte w próbce danych

W celu ograniczenia rozmiaru pliku w pamięci usunięta zostaje nadmiarowa kolumna. Wyświetlone zostają dane na temat próbki.

```
df_maszyny=df_maszyny.drop(columns=['xyz'])
df_maszyny.head(1)
```

|   | czas                      | x | y | z |
|---|---------------------------|---|---|---|
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z0 | 0 | 0 |   |

```
df_maszyny.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 339 entries, 3 to 679
Data columns (total 4 columns):
czas 339 non-null object
x 339 non-null object
y 339 non-null object
z 339 non-null object
dtypes: object(4)
memory usage: 13.2+ KB
```

### Zmiana typów danych na numeryczne

Dane przesyłane z do platformy analiz mają postać tekstową. Konieczna jest ich konwersja na typ numeryczny.

```
df_maszyny['x'] = pd.to_numeric(df_maszyny['x'])
df_maszyny['y'] = pd.to_numeric(df_maszyny['y'])
df_maszyny['z'] = pd.to_numeric(df_maszyny['z'])
df_maszyny.dtypes
```

```
czas object
x float64
y float64
z float64
dtype: object
```

### Kalkulacja i dodanie RMS jako nowa seria danych

```
df_maszyny['rms'] = df_maszyny.apply(lambda row:
np.sqrt((row.x**2 + row.y**2 + row.z**2)/3), axis=1)
df_maszyny.head(1)
```

|   | czas                        | x   | y   | z   | rms |
|---|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 3 | 2018-11-29T09:39:28.780Z0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

## Charakterystyka statystyczna próbki danych

Po przekształceniach do formy numerycznej możliwa jest statyczna charakterystyka próbki.

```
df_maszyny.describe()
```

|       | x          | y          | z          | rms        |
|-------|------------|------------|------------|------------|
| count | 339.000000 | 339.000000 | 339.000000 | 339.000000 |
| mean  | 0.077455   | 0.404507   | 1.818066   | 1.274512   |
| std   | 1.115736   | 0.694276   | 0.438844   | 0.415202   |
| min   | -1.632812  | -4.074707  | 0.000000   | 0.000000   |
| 25%   | -0.767822  | 0.109863   | 1.615723   | 1.158997   |
| 50%   | 0.172852   | 0.403809   | 1.787598   | 1.189885   |
| 75%   | 0.320801   | 0.741699   | 2.057617   | 1.209462   |
| max   | 6.303223   | 2.803711   | 3.369629   | 3.951056   |

## Przetworzenie formatu czasu próbki na właściwy dla serii danych

```
df_maszyny['czas'] = df_maszyny.apply(lambda row:
datetime.strptime(row['czas'], '%Y-%m-%dT%H:%M:%S.%fZ'), axis=1)
df_maszyny.head(1)
```

|   | czas                    | x         | y        | z        | rms      |
|---|-------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| 9 | 2018-11-29 09:39:29.948 | -0.311523 | 0.626465 | 2.291992 | 1.383562 |

## Wskazanie czas jako indeksu dla próbki danych

```
df_maszyny = df_maszyny.set_index('czas').sort_index()
df_maszyny=df_maszyny.drop(columns=['rms'])
df_maszyny.head(10)
```

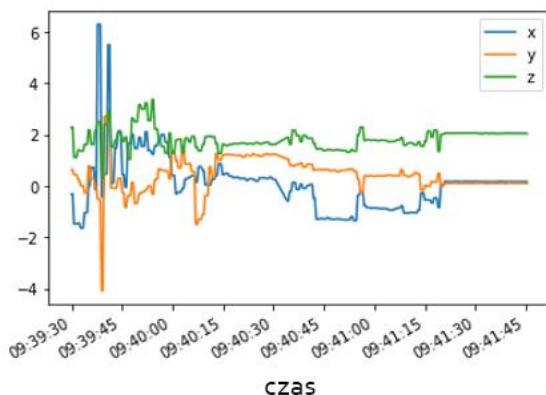
| czas                    | x         | y        | z        |
|-------------------------|-----------|----------|----------|
| 2018-11-29 09:39:29.948 | -0.311523 | 0.626465 | 2.291992 |
| 2018-11-29 09:39:30.338 | -0.311523 | 0.626465 | 2.291992 |
| 2018-11-29 09:39:30.728 | -1.473633 | 0.450684 | 1.120605 |
| 2018-11-29 09:39:31.119 | -1.473633 | 0.450684 | 1.120605 |

## Wizualizacja serii danych

Po przeprowadzeniu przekształceń możliwa jest wizualizacja szeregów czasowych serii danych x, y, z.

```
df_maszyny.plot()
```

```
<matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x2d670d536a0>
```



### Agregacja zgromadzonych wyników do wymiaru 1 sekundy

Identyfikacja motywów prowadzona będzie, ze względu na złożoność obliczeniową, jak charakterystykę domeny, w odniesieniu do 1 sekundowych agregatów.

```
#sumowanie do 1 sekundy
df_maszynny2 = df_maszynny.resample('1S').sum()
df_maszynny2.head(3)
```

| czas                | x         | y         | z         | rms            |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 2018-11-29 09:39:28 | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.0000000 | 0.000000       |
| 2018-11-29 09:39:29 | -0.311523 |           | 0.6264652 | 2919921.383562 |
| 2018-11-29 09:39:30 | -1.785156 |           | 1.0771483 | 4125982.483633 |

```
df_maszynny2.info()
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
DatetimeIndex: 138 entries, 2018-11-29 09:39:28 to 2018-11-29 09:41:45
Freq: S
Data columns (total 4 columns):
x 138 non-null float64
y 138 non-null float64
z 138 non-null float64
rms 138 non-null float64
dtypes: float64(4)
memory usage: 5.4 KB
```

## Usunięcie zagregowanych serii: x, y, z

Serie danych x, y, z zawierają zagregowane wartości wychyleń co nie stanowi już reprezentacji tychże wychyleń. Ze względu na różny zwrot notowanych przyśpieszeń.

```
df_maszyny2=df_maszyny2.drop(columns=['x','y','z'])
df_maszyny2.head(1)
```

```
czas          rms
2018-11-29 09:39:28 0.0
```

```
df_maszyny2.tail(1)
```

```
czas          rms
2018-11-29 09:41:45 1.187652
```

## Usunięcie pustych wierszy

Z momentem przyjęcia indeksu próbki danych jako czas. Wygenerowane zostały puste rekordy. Puste rekordy są tożsame z czasami gdy nie był prowadzony zapis danych – ze względu na brak baterii, nie dostępność platformy agregacji danych.

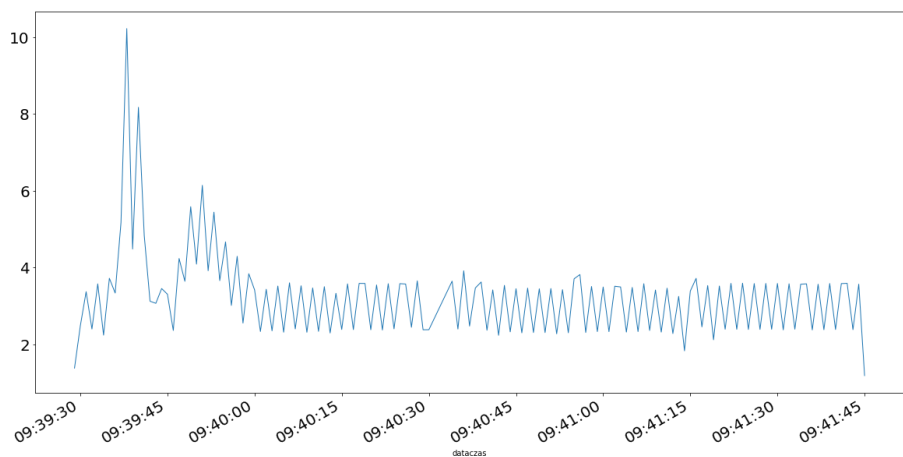
```
df_maszyny2=df_maszyny2[df_maszyny2['rms'] !=0]
df_maszyny2.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
DatetimeIndex: 134 entries, 2018-11-29 09:39:29 to 2018-11-29 09:41:45
Data columns (total 1 columns):
rms 134 non-null float64
dtypes: float64(1)
memory usage: 2.1 KB
```

## Próbka serii danych po transformacji

```
df_maszyny2['rms'].plot(figsize=(20,10), linewidth=1,
fontsize=20)
```

```
<matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x2474cfddfd0>
```



**Zapis wyczyszczonej próbki danych do dalszych analiz**

```
df_maszyny2.to_csv('C:\\Users\\Jakub\\Documents\\Jakub\\Dane\\Sample MP ready\\Tokarka\\Sample3_MP_ready.csv')
```

## Załącznik nr 2

### Algorytm wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny

---

```
library('tsmp')

rd<- read.csv(file="C:/Users/Jakub/Documents/Dane/Gotowe/Sample
MP_ready/Frezarka/Sample_Frezarka_Total.csv", header=TRUE)
wektor<-rd$rms

licznik<-0
w_procesu_czas<-0
anomalια_wektor<-0
w_procesu<-0
n<-3600
by<-1800

petla_dynamiczna <- function(x, n,by) {
  #out <- rep(NA, length(x))
  powieksz<-by

  offset <- trunc(n / 2)
  for (i in (offset + 1):(length(x) - n + offset +1)) {

    if (i==by+1){
      okno_danych <- x[(i - offset):(i + offset - 1)]
      mp <- tsmp(okno_danych , window_size = 390, n_workers =
4,verbose = 3)
      mp_lan <- find_chains(mp)

      mp_lan_elementy<-mp_lan[["chain"]][["best"]]
      w_procesu<-c(w_procesu,mp_lan_elementy)#starty procesu
      w_procesu_czas<-c(w_procesu_czas,diff(mp_lan_elementy, 1))

      licznik<-licznik+1

      #print(x[(i - offset):(i + offset - 1)])
      by<-by+powieksz
    }
    wynik_petli<-
list('w_procesu_czas'=w_procesu_czas,'licznik'=licznik)
  }
  return(wynik_petli)
}
czas_procesu<-petla_dynamiczna(wektor,n,by)
```

```

wynik_czas_trwa_procesu<-czas_procesu$w_procesu_czas[-1]
czas_procesu_licznik<-czas_procesu$licznik

#Czyszczenie danych - usunięcie punktów odstających
w_czas_trwa_procesu_odst<-boxplot(wynik_czas_trwa_procesu, plot
= FALSE)$out
#Analiza wykluczając pierwszy element
w_czas_trwa_procesu_cz<-wynik_czas_trwa_procesu[-
which(wynik_czas_trwa_procesu %in% w_czas_trwa_procesu_odst)]

#Wyświetlenie wyniku
summary(wynik_czas_trwa_procesu)
summary(w_czas_trwa_procesu_cz)
#Mediana
median(wynik_czas_trwa_procesu)
median(w_czas_trwa_procesu_cz)
#Średnia
mean(wynik_czas_trwa_procesu)
mean(w_czas_trwa_procesu_cz)

#Zachowaj w środowisku R
obrobka_Frezarka_Total<-
list("wynik_czas_trwa_procesu"=wynik_czas_trwa_procesu,'w_czas_t
rwa_procesu_cz'=w_czas_trwa_procesu_cz,'czas_procesu_licznik'=cz
as_procesu_licznik)

```

### **Algorytm wyznaczania wskaźnika efektywności danej maszyny**

```

library('tsmp')

rd<- read.csv(file="C:/Users/Jakub/Documents/Dane/Gotowe/Sample
MP_ready/Tokarka/Sample27_MP_ready.csv", header=TRUE)

mark<-5
wektor<-rd$rms
#wektor<-rd$rms[c(1:10000)]
n<-3600
by<-1800 #co pół godziny przeprowadzana jest analiza

licznik<-0
w_operacji_czas<-0
anomalia_wektor<-0
w_operacji<-0
norm_proc_czas<-600

```

```

#norm_proc_czas<-390
oeo_wskaznik_petla_cal<-0
dostepnosc_wskaznik_petla_cal<-0
wydajnosc_wskaznik_petla_cal<-0
jakosc_wskaznik_petla_cal<-0

#Definicja pętli dynamicznej
#petla_dynamiczna <- function(x, n,by) {
  powieksz<-by
  offset <- trunc(n / 2)
  for (i in (offset + 1):(length(wektor) - n + offset + 1)) {
    if (i==by+1){
      okno_danych <- wektor[(i - offset):(i + offset - 1)]
      #oeo
      mp <- tsmc(okno_danych, window_size = norm_proc_czas, n_workers
        = 4, verbose = 3)
      mp_lan <- find_chains(mp)
      mp_lan_elementy<-mp_lan[["chain"]][["best"]]
      #mp_wzorze<-find_motif(mp, n_motifs = 1)
      #mp_obrobka_wzorze<-
      sort(c(unlist(mp_wzorze[["motif"]][["motif_idx"]]),unlist(mp_wz
        orze[["motif"]][["motif_neighbor"]]))))
      #efektywny_czas_pracy<-sum(diff(mp_obrobka_wzorze))/60
      #minutach
      efektywny_czas_pracy<-
      (length(mp_lan_elementy)*norm_proc_czas) #minutach
      #Czas
      calkowity_czas_produkcyj<-length(okno_danych) #[minuty]
      Wprowadź całkowity czas produkcji dostępny dla wszystkich
      urządzeń, w odpowiednim okresie (np. długość zmiany wyrażona
      w minutach).
      #wydajność
      calkowity_wolumen_wykonanej_produkcyj<-
      length(mp_lan_elementy) #[liczba sztuk] Wprowadź całkowita...
      liczbę wyprodukowanych sztuk (dobra i odrzucona / zlecona)
      w analizowanym okresie.
      #normatywny_czas_cyklu<-length(okno_danych)/norm_proc_czas #
      #[sztuk na godzinę]Wprowadź liczbę sztuk na minutę, które
      powinny zostać wyprodukowane przy urządzeniu pracującym
      z prędkością znamionową   normatywny_czas_cyklu<-8
      #jakość
      ilosc_brakow<-runif(n=1,min=0,max=1) #Wprowadź liczbę braków
      lub częściodrzuconych wyprodukowanych w odpowiednim okresie.
      dostepnosc_wskaznik<-
      efektywny_czas_pracy/(calkowity_czas_produkcyj)

```

```

        wydajnosć_wskaznik<-
calkowity_wolumen_wykonanej_produkcji/normatywny_czas_cyklu
        jakosc_wskaznik<-(calkowity_wolumen_wykonanej_produkcji-
ilosc_brakow)/calkowity_wolumen_wykonanej_produkcji
        oee_wskaznik<-
(dostepnosc_wskaznik*wydajnosć_wskaznik*jakosc_wskaznik)*100
        #oee_wskaznik
        oee_wskaznik_petla<-c(oee_wskaznik_petla_cal,oee_wskaznik)
        oee_wskaznik_petla_cal=oee_wskaznik_petla
        dostepnosc_wskaznik_petla<-
c(dostepnosc_wskaznik_petla,dostepnosc_wskaznik)
        dostepnosc_wskaznik_petla_cal<-dostepnosc_wskaznik_petla
        wydajnosć_wskaznik_petla<-
c(wydajnosć_wskaznik_petla,wydajnosć_wskaznik)
        wydajnosć_wskaznik_petla_cal<-wydajnosć_wskaznik_petla
        jakosc_wskaznik_petla<-
c(jakosc_wskaznik_petla,jakosc_wskaznik)
        jakosc_wskaznik_petla_cal<-jakosc_wskaznik_petla
        #oee
        #print(x[(i - offset):(i + offset - 1)])
        by<-by+powieksza
    }
    wynik_petli<-list('oee_wektor'=oee_wskaznik_petla_cal,
"dostepnosc_wskaznik_petla_cal"=dostepnosc_wskaznik_petla_cal,
'wydajnosć_wskaznik_petla_cal'=wydajnosć_wskaznik_petla_cal,
'jakosc_wskaznik_petla_cal'=jakosc_wskaznik_petla_cal)
    }
    # return(wynik_petli)
    #}
    #oee<-petla_dynamiczna(wektor,n,by)

wynik_oee<-wynik_petli$oee_wektor[-1]
wynik_dost<-wynik_petli$dostepnosc_wskaznik_petla_cal[-1]
wynik_jak<-wynik_petli$jakosc_wskaznik_petla_cal[-1]
wynik_wyd<-wynik_petli$wydajnosć_wskaznik_petla_cal[-1]
#licznik_anomalie<-anomalie$licznik
dostepnosc_wskaznik
jakosc_wskaznik
wydajnosć_wskaznik
wynik_oee_odst<-boxplot(wynik_anomalie, plot = FALSE)$out
#Analiza wykluczając pierwszy element
wynik_oee_czc<-wynik_oee [-which(wynik_oee %in% wynik_oee_odst)]

```

```
#####
oe_wynik_27<-
list("wynik_anomalie"=wynik_oe,'mediana'=median(wynik_oe),'sre
dnia'=mean(wynik_oe), 'wynik_dost'=wynik_dost,
'wynik_jak'=wynik_jak, 'wynik_wyd'=wynik_wyd)
```

## Algorytm dynamiczny wyznaczenia czasu wystąpienia zaburzenia

```
library('tsmp')

rd<- read.csv(file="C:/Users/Jakub/Documents/Dane/Gotowe/Sample
MP ready/Frezarka/Sample_Frezarka_Total.csv", header=TRUE)
mark<-5
wektor<-rd$rms
n<-3600
by<-1800

licznik<-0
w_procesu_czas<-0
anomalial_wektor<-0
w_procesu<-0
#Definicja pętli dynamicznej
petla_dynamiczna <- function(x, n,by) {
  powieksz<-by

  offset <- trunc(n / 2)
  for (i in (offset + 1):(length(x) - n + offset +1)) {

    if (i==by+1){
      okno_danych <- x[(i - offset):(i + offset - 1)]
      mp <- tsmp(okno_danych , window_size = 390, n_workers =
4,verbose = 3)
      mp_lan <- find_chains(mp)

      mp_lan_elementy<-mp_lan[["chain"]][["best"]]
      mp_lan_dlugosc<-length(mp_lan_elementy)
      w_procesu<-c(w_procesu,mp_lan_elementy)
      #start procesu
      w_procesu_czas<-c(w_procesu_czas,diff(mp_lan_elementy, 1))

      licznik<-licznik+1
      #anomalial
      mp_anomalial<-find_discord(mp, n_discords = 1, radius = 15)
      for (mp_lan_element in 1:mp_lan_dlugosc)
      {
```

```

if(mp_anomalia$discord$discord_idx<mp_lan_elementy[mp_lan_element] )
{
  anomalia<-mp_anomalia$discord$discord_idx-
mp_lan_elementy[mp_lan_element-1]
  #powinno najpierw wyłąpać gdzie jest anomalia i po jakim czasie
  od rozpoczęcia.
  anomalia_wektor<-c(anomalia_wektor,anomalia)
  #zatrzymaj pętlę
  break
}
}
#print(x[(i - offset):(i + offset - 1)])
by<-by+powieksza

}
wynik_petli<-
list('w_procesu_czas'=w_procesu_czas,'licznik'=licznik,'anomalia
_wektor'=anomalia_wektor)
}
return(wynik_petli)
}
anomalie<-petla_dynamiczna(wektor,n,by)

wynik_anomalie<-anomalie$anomalia_wektor[-1]
licznik_anomalie<-anomalie$licznik

#Czyszczenie danych - usunięcie punktów odstających
wynik_anomalie_odst<-boxplot(wynik_anomalie, plot = FALSE)$out
#Analiza wykluczając pierwszy element
wynik_anomalie_cz<-wynik_anomalie[-which(wynik_anomalie %in%
wynik_anomalie_odst)]
#Wyświetlenie wyniku
summary(wynik_anomalie)
summary(wynik_anomalie_cz)
#Mediana
median(wynik_anomalie)
median(wynik_anomalie_cz)
#Średnia
mean(wynik_anomalie)
mean(wynik_anomalie_cz)
#Zachowaj w środowisku R
anomalie_Sample_Frezarka_Total<-
list("wynik_anomalie"=wynik_anomalie,'wynik_anomalie_cz'=wynik_a
nomalie_cz,'licznik_anomalie'=licznik_anomalie)

```