



Instytut Inżynierii  
Mechanicznej  
ul. Szafrana 4  
65-246 Zielona Góra

tel. (0-68) 328-22-73  
sekretariat@iim.uz.zgora.pl



ISBN 978-83-959326-7-0



20

# INŻYNIERIA

# PRODUKCJI

*Badania  
w inżynierii  
mechanicznej*

Pod redakcją:  
Justyny Patalas-Maliszewskiej  
Juliana Jakubowskiego

# ZiP

Uniwersytet Zielonogórski  
Zielona Góra 2023

# **INŻYNIERIA PRODUKCJI**

***Badania  
w inżynierii mechanicznej***

Pod redakcją:  
Justyny Patalas-Maliszewskiej  
Juliana Jakubowskiego

Vol. XX



Zielona Góra 2023

## UNIwersytet ZIELONOGÓRSKI



Wydawnictwo Naukowe Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego  
Wydawnictwo Naukowe Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego wydaje monografię na licencji CC



### Autorzy rozdziałów:

**Rozdział 1:** Aleksandra Jędrzejewska, Roman Kielec, Paweł Kaźmierczak

**Rozdział 2:** Roman Kielec, Aleksandra Jędrzejewska, Paweł Kaźmierczak

**Rozdział 3:** Roman Kielec, Paweł Kaźmierczak, Aleksandra Jędrzejewska

**Rozdział 4:** Patryk Jurgas, Marek Sałamaj

**Rozdział 5:** Michał Cał, Marek Malinowski, Tomasz Belica

**Rozdział 6:** Mateusz Tetera, Małgorzata Śliwa

**Rozdział 7:** Andrzej Marek Lasota, Kornel Polańczyk

**Rozdział 8:** Katarzyna Mądry, Iwona Pająk

**Rozdział 9:** Marek Rybakowski, Waldemar Bobaryko

**Rozdział 10:** Julian Jakubowski, Mateusz Przymuszała

Redakcja naukowa: **Justyna Patalas-Maliszewska, Julian Jakubowski,**

Recenzenci: **prof. Milan Edl, dr hab. inż. Grzegorz Bocewicz, prof. Politechniki Koszalińskiej**

ISBN 978-83-959326-7-0



9 788395 932670

<i>Spis treści</i>	
Przedmowa .....	5
<b>Rozdział 1</b>	
Spektroskopia Ramana w procesie wytwarzania tlenku tytanu (IV) .....	7
<i>Aleksandra Jędrzejewska, Roman Kielec, Paweł Kaźmierczak</i>	
<b>Rozdział 2</b>	
Inżynieria współbieżna w przebiegu procesu produkcyjnego w wybranym przedsiębiorstwie .....	21
<i>Roman Kielec, Aleksandra Jędrzejewska, Paweł Kaźmierczak</i>	
<b>Rozdział 3</b>	
Rozwiązania konstrukcyjne rozpraszacza fal akustycznych oraz ich wpływ na skuteczność minimalizowania poziomu dźwięku na stanowisku pracy .....	31
<i>Roman Kielec, Paweł Kaźmierczak, Aleksandra Jędrzejewska</i>	
<b>Rozdział 4</b>	
Optymalizacja procesu lutowania w zakresie redukcji frakcji niezgodności oraz strat materiałowych .....	41
<i>Patryk Jurgas, Marek Salamaj</i>	
<b>Rozdział 5</b>	
Automatyzacja procesu transportu i pakowania butelek pet w rozlewni wody – studium przypadku .....	65
<i>Michał Cal, Marek Malinowski, Tomasz Belica</i>	
<b>Rozdział 6</b>	
Analiza efektywności kompletacji zamówień przy wykorzystaniu systemu i-pack na przykładzie magazynu rzeczywistego przedsiębiorstwa .....	81
<i>Mateusz Tetera, Małgorzata Śliwa</i>	
<b>Rozdział 7</b>	
Ocena i diagnostyka ergonomiczna na stanowisku paletowania obrzeży betonowych .	95
<i>Andrzej Marek Lasota, Kornel Polańczyk</i>	
<b>Rozdział 8</b>	
Zastosowanie uczenia maszynowego w predykcyjnym utrzymaniu ruchu .....	105
<i>Katarzyna Mądry, Iwona Pająk</i>	
<b>Rozdział 9</b>	
Nowe wymagania zasadnicze dla środków ochrony indywidualnej – rozporządzenie nowego podejścia.....	115
<i>Marek Rybakowski, Waldemar Bobaryko</i>	
<b>Rozdział 10</b>	
Badania symulacyjne procesów formowania wyprasek z tworzyw sztucznych .....	129
<i>Julian Jakubowski, Mateusz Przymuszała</i>	
Informacja o autorach .....	143



## PRZEDMOWA

Szanowni Państwo,

współpraca nauki i biznesu w obszarze inżynierii mechanicznej jest elementem, który zapewnia aktualność prowadzonych prac badawczych i pokazuje ich znaczenie użytkowe. Stanowi również bardzo często impuls do kreowania nowych rozwiązań i zgłaszania wynalazków do ochrony patentowej. W obszarze inżynierii produkcji implementacja nowoczesnych technologii zgodnie z realizacją koncepcji Przemysłu 4.0 czy wręcz już Przemysłu 5.0 jest możliwa dzięki prowadzeniu prac badawczo-rozwojowych. Niniejsza książka jest już dwudziestym tomem serii „Inżynieria Produkcji”, który to obszar jest obecnie włączony w dyscyplinę naukową: inżynieria mechaniczna. Redaktorzy tej serii prezentują wyniki badań prowadzonych przez studentów kierunków m.in. Mechanika i Budowa Maszyn, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Bezpieczeństwo i Higiena Pracy oraz pokrewnych, które powstały w wyniku zaangażowania i wsparcia pracowników realizujących prace naukowe i dydaktyczne w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Obecny tom prezentuje w większości rezultaty badawcze mające zastosowanie w praktyce gospodarczej.

W rozdziale pierwszym uwagę skoncentrowano na konieczności prowadzenia kontroli nad produkcją i właściwościami  $TiO_2$ , co pozwala na większą wydajność, elastyczność i ekonomiczność wytwarzania tlenku tytanu (IV). Jedną z najlepiej odpowiadającym wymaganiom produkcyjnym technik analizy tego materiału stanowi spektroskopia Ramana ze względu na możliwość włączenia analiz bezpośrednio w procesy produkcyjne i badania w czasie rzeczywistym, a przy tym uzyskiwanie niezbędnych informacji o stanie surowca w trakcie procesów prowadzących do wytworzenia  $TiO_2$ . Spektroskopia Ramana dostarcza informacji o składzie fazowym tlenku tytanu (IV), zawartości poszczególnych form krystalicznych w badanym  $TiO_2$ , a także jego czystości i zanieczyszczeniu. Pozwala także określić zawartość tlenku tytanu (IV) w badanej próbce, w tym ilości śladowych, potwierdzając osadzenie  $TiO_2$  na badanej powierzchni. Kolejny rozdział to analiza rzeczywistego procesu produkcyjnego skrzynki elektrycznej w wybranym przedsiębiorstwie. W pierwszej części przybliżono zagadnienia teoretyczne dotyczące harmonogramu Gantta, metody ścieżki krytycznej oraz macierzy sprzężeń. Następnie, za pomocą tak zdefiniowanych metod przedstawiono przebieg wytwarzania produktu i zoptymalizowano proces produkcyjny posługując się macierzą sprzężeń, którą w następnej kolejności poddano szczegółowej analizie. Dzięki optymalizacji postaci rzeczywistego procesu produkcyjnego za pomocą macierzy sprzężeń otrzymano istotnie zredukowany czas i koszt wytworzenia skrzynki elektrycznej. W rozdziale trzecim przedstawiono z kolei wyniki badań nad rozwiązaniami konstrukcyjnymi elementów rozpraszacza dźwięku oraz ich wpływem na jego skuteczność. Pomiary wykonywano w Laboratorium Akustyki Parku Naukowo – Technologicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego. Podkreślono, że zmniejszenie narażenia na hałas stanowi obowiązek pracodawców i służb Bezpieczeństwa i Higieny Pracy. Następne rozdziały to również przegląd rozwiązań użytecznych dla praktyki gospodarczej. Rozdział czwarty to analiza możliwości optymalizacji procesu lutowania miękkiego w robocie produkcyjnym Combitrans. W części teoretycznej zaprezentowano zagadnienia związane z lutowaniem miękkim oraz twardym. Przedstawiono pojęcia związane z zarządzaniem jakością, m.in. diagram Ishikawy czy mapę procesu produkcyjnego. Natomiast, w części praktycznej opisano proces produkcyjny lutowania miękkiego w automacie Combitrans, dokonano analizy dokumentacji produkcyjnej, opisano budowę automatu Combitrans jak również wyjaśniono działanie stacji lutowniczej. W rezultacie zaproponowano możliwe udoskonalenia stacji lutowniczej. W rozdziale piątym zaprezentowano metodykę, a następnie realizację procesu projektowania dla wybranego przypadku zautomatyzowanego procesu transportu i pakowania butelek PET przed procesem grzewania pakietu butelek. Do analizy wybrano cztery koncepcje najazdu linii

transportującej, które poddano ocenie metodą ważenia kryteriów. Na podstawie wyników analizy dobrano przenośnik taśmowy o zakrzywionym torze ruchu, a następnie, w celu zautomatyzowania sekcji pakującej, ustalono optymalną konfigurację układu roboczego i sterującego. W konsekwencji przeprowadzono symulację układu w programie FESTO FluidSIM, a następnie wybrano środki techniczne z katalogu firmy FESTO oraz zbudowano model układu roboczo-wykonawczego dla sekcji pakującej. Rozdział szósty to analiza efektywności systemu wspierającego automatyczne pakowanie zleceń w wybranym przedsiębiorstwie dystrybucyjnym, tj. systemu I-Pack. Przeprowadzono badania dotyczące niezawodności, wydajności, efektywności pakowania i załadunku przed i po wprowadzeniu systemu I-Pack. Kolejny rozdział to przykład zastosowania ergonomii przemysłowej w postaci oceny i diagnozy ergonomicznej na stanowisku paletowania obrzeży betonowych metodą RULA. Przedstawiono projekt koncepcyjny interwencji ergonomicznej oraz jego weryfikację. W rozdziale ósmym przedyskutowano i zweryfikowano możliwości predykcji wartości wskaźnika Remaining Useful Life (RUL) za pomocą jednokierunkowej wielowarstwowej sieci neuronowej. RUL pozwala definiować żywotność maszyn w systemie predykcyjnego utrzymania ruchu. Umożliwia zaplanowanie potrzebnych konserwacji, wymiany części czy zaplanowanie kupna nowej maszyny. Dzięki temu ograniczane są przestoje oraz nieplanowane wydatki przedsiębiorstwa. Otrzymany w wyniku badań model dał dla zbioru testowego wysoką dokładność (98,7%) jednak powinien on być jeszcze poprawiony ze względu na stosunkowo niską dokładność (71,1%) rozpoznawania stanów bliskich awarii tzn. stanów o niskich wartościach wskaźnika RUL. Rozdział dziewiąty to zaprezentowanie zmian w zakresie certyfikacji oraz europejskiej oceny zgodności dla środków ochrony indywidualnej od dnia 21 kwietnia 2023 roku. Przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy stanowią podstawowy zbiór norm ochrony pracy. Rozdział zamykający niniejszą książkę to przegląd procesów przetwórstwa tworzyw sztucznych i wykorzystywanych w nich materiałów. Główna uwaga została poświęcona procesowi formowania wtryskowego tworzyw sztucznych, otrzymywanych w ich procesie wyrobom oraz zagadnieniom z nimi związanym. Opisano proces projektowania wyprasek technologicznie poprawnych, których wytwórstwo odbywać ma się w procesie formowania wtryskowego tworzyw sztucznych. Utworzono przykładowy model 3D wypraski w programie CAD, a następnie przeprowadzono weryfikację poprawności geometrii utworzonego modelu wypraski, przy pomocy programu do symulacji wtrysku tworzyw sztucznych oraz dokonano interpretacji wyników analizy. Na ich podstawie podjęto próbę optymalizacji modelu poprzez modyfikację jego geometrii. Skuteczność przeprowadzonej optymalizacji zweryfikowano przez ponowne przeprowadzenie analizy z identycznymi warunkami brzegowymi, lecz z wykorzystaniem zaktualizowanego modelu. Efekt podjętych działań optymalizacyjnych modelu 3D przedstawiono poprzez sporządzenie porównania wyników obu analiz i geometrii modeli.

*Oddając Państwu ten jubileuszowy - XX tom - Zeszytów Inżynierii Produkcji udowadniamy, że ten obszar wiedzy stanowi ważny element badań w inżynierii mechanicznej. Doskonała jakość prowadzonych badań naukowych w tej dyscyplinie naukowej Uniwersytetu Zielonogórskiego jest możliwa dzięki właśnie ścisłej współpracy nauki i przedsiębiorstw i zachęcaniu młodych adeptów nauki do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań.*

*Mając nadzieję na życzliwe przyjęcie książki, gorąco zachęcamy do lektury.*

Redaktorzy

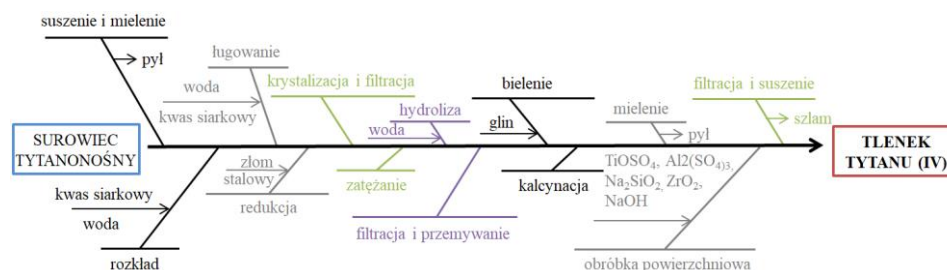
# SPEKTROSKOPIA RAMANA W PROCESIE WYTWARZANIA TLENKU TYTANU (IV)

## 1. WPROWADZENIE

Tlenek tytanu (IV) jest naturalnie występującym najtrwalszym tlenkiem tytanu o szerokim obszarze zastosowania, w którym można wyróżnić m.in. farmację, kosmetykę, przemysł budowlany i medycynę [1, 2]. Stosuje się go np. jako: biały pigment farb, tuszy, tworzyw sztucznych, ceramiki składnik filtrów do opalania i past do zębów, czy też wypełniacz leków i powłokę na implanty medyczne. Tlenek ten posiada intensywną białą barwę, dużą powierzchnię właściwą, wysoki współczynnik załamania światła i właściwości hydrofilowe [3-5]. Nanometryczny  $\text{TiO}_2$  posiada większą hydrofilowość, powierzchnię właściwą i aktywność fotokatalityczną niż jego mikrometryczny odpowiednik [5]. Dodatkowo nano- $\text{TiO}_2$  jest biokompatybilny i posiada właściwości antybakteryjne, co umożliwia zastosowanie go w medycynie. Ponadto charakteryzuje go odporność na korozję, stabilność i obojętność chemiczną [1]. Z tego względu większość badań nad wykorzystaniem i właściwościami tego tlenku dotyczy nano- $\text{TiO}_2$ .

Tlenek tytanu (IV) występuje w formie amorficznej i w trzech formach krystalicznych: anataz, rutyl i brukit [6]. W procesach niskotemperaturowych i niskoprądowych powstający  $\text{TiO}_2$  posiada postać amorficzną [7]. Forma ta pod wpływem modyfikacji termicznej ulega przemianom w strukturę krystaliczną anatazu lub rutylu [8]. Modyfikacja ta polega na wyżarzaniu  $\text{TiO}_2$  w temperaturze od  $300^\circ\text{C}$  do  $800^\circ\text{C}$ , anataz krystalizuje w temperaturze od  $300^\circ\text{C}$  do  $450^\circ\text{C}$ , powyżej  $450^\circ\text{C}$  anataz stopniowo zmienia się w rutyl aż do temperatury  $80^\circ\text{C}$ . Właściwości tlenku tytanu (IV) są zależne od jego postaci i rozmiaru cząstki, co związane jest z zastosowaną metodą produkcji i modyfikacji  $\text{TiO}_2$  jak np. modyfikacja termiczna [9-12]. Całkowicie zapełnione pasmo walencyjne i puste pasmo przewodnictwa nadaje  $\text{TiO}_2$  właściwości fotokatalityczne, które jednak zaobserwowano wyłącznie dla nanocząstek  $\text{TiO}_2$  [13]. W związku z zależnością właściwości tlenku tytanu (IV) od jego formy i rozmiaru do analizy jego właściwości często wykorzystuje się spektroskopię Ramana. Ta metoda pomiarowa umożliwia kontrolę procesu wytwarzania  $\text{TiO}_2$  w czasie rzeczywistym, w tym np. obserwację przejść formy amorficznej w strukturę krystaliczną anatazu lub rutylu [14, 15]. Głównymi metodami wytwarzania tlenku tytanu (IV) są metoda siarczanowa i chlorkowa. Metody te są długotrwałe i wieloetapowe co przedstawiono schematycznie dla metody siarczanowej na Rys. . Ze względu na złożoność procesu produkcji tlenku tytanu (IV) jego kontrola na każdym z etapów przynosi wiele korzyści. Celem pracy było określenie obszarów zastosowania spektroskopii Ramana w procesach produkcyjnych i analizie właściwości tlenku tytanu (IV).





Rys. 1. Schemat procesu wytwarzania tlenku tytanu (IV) na przykładzie metody siarczanej

### 1.1. Spektroskopia Ramana i jej zastosowania

W 1928 r. hinduski fizyk Chandrashekhara V. Raman zaobserwował po raz pierwszy efekt Ramana, na bazie którego opracowano w późniejszych latach metodę analityczną o nazwie spektroskopia Ramana [16]. Efekt Ramana polega niesprężystym rozproszeniu fotonów przez badaną cząsteczkę, której wzbudzenie powoduje zjawisko przejść pomiędzy poziomami oscylacyjnymi lub rotacyjnymi cząstek. Odróżnia to spektroskopię ramanowską od spektroskopii w podczerwieni, której działanie jest oparte o absorpcję fal świetlnych [17]. Kolejną różnicę stanowi możliwość zbadania próbki o dużej zawartości wody techniką spektroskopii Ramana, podczas gdy nie jest to możliwe dla spektroskopii w podczerwieni. Techniki pomiaru spektroskopią Ramana i w podczerwieni są komplementarne. Jako metoda tańsza i szybsza spektroskopia w podczerwieni początkowo była stosowana częściej niż spektroskopia ramanowska, co związane było z wysokimi wymaganiami tej techniki pomiarowej takimi jak niezwykle czuła detekcja, długi czas ekspozycji oraz stabilne i intensywne źródło światła wzbudzającego próbkę. W latach sześćdziesiątych rozwój monochromatycznych źródeł światła o odpowiedniej spójności, wąskim strumieniu i dużym natężeniu pozwolił na zrewolucjonizowanie spektroskopii Ramana i rozpowszechnienie jej zastosowania. Opracowane źródła światła obecnie występują w postaci laserów, które umożliwiają badanie małych ilości próbek, preparatów kolorowych i w rozcieńczonych roztworach, zarówno próbek stałych jak i cieczy oraz gazów, a także w warunkach wysokiej temperatury i próżni oraz wielu innych niestandardowych warunkach. Rozwój spektroskopii Ramana możliwy był także dzięki postępowi w mikroelektronice i powstaniu czułych detektorów, co prowadziło do obniżenia kosztów wytworzenia spektroskopu Ramana, jego prostszego użytkowania i przyspieszenia analizy dzięki rozwojowi matematycznych metod obróbki danych [18]. Czynniki te pozwoliły na wszechstronność zastosowania tej techniki pomiarowej i jej większą przydatność w porównaniu do spektroskopii w podczerwieni. Dodatkowymi funkcjami wyróżniającymi spektroskopię Ramana wśród technik spektroskopowych jest możliwość wykonania spektroskopii czasowo-rozdzielczej i wykonywanie badań kinetycznych.

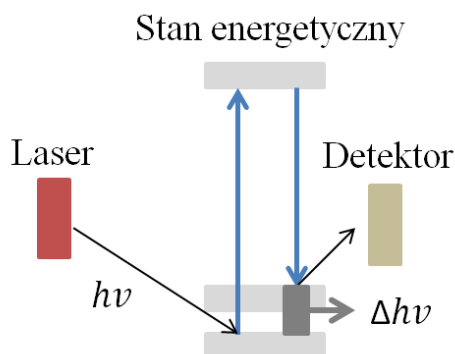
Obszar zastosowań spektroskopii Ramana jest duży, a technikę tę można z powodzeniem połączyć z innymi technikami pomiarowymi takimi jak mikroskopia sil atomowych czy mikroskopia konfokalna co zwiększa możliwości wykorzystania tej techniki zarówno w badaniach akademickich i przemysłowych laboratoriach analitycznych.

Wśród przykładowych obszarów zastosowań spektroskopii Ramana można wymienić: farmację [19-21], produkcję tworzyw sztucznych, kontrolę bioprocessów np. przy produkcji etanolu [22], przemysł spożywczy [23, 24], branżę naftową [25, 26], diagnostykę medyczną i analizy biochemiczne [27, 28], produkcję powłok ochronnych [29], charakterystykę powierzchni materiałów w tym materiałów nanostrukturalnych [30-32], przemysł kosmetyczny [33], przemysł elektroniczny, a także badania i nauka.

Tak duże zainteresowanie spektroskopia Ramana w różnych gałęziach przemysłu ma związek z potrzebą kontroli procesu produkcyjnego, która stanowi jedno z największych wyzwań jakie stoi przed przemysłem z XXI wieku. Technika ta umożliwia bowiem monitorowanie i kontrolę procesów zachodzących podczas produkcji w czasie rzeczywistym, jest więc stosowana do kontroli procesu w trybie ciągłym. Spektroskopię Ramana stosuje się więc wszędzie tam, gdzie klasyczna kontrola jakości jest nieefektywna lub zbyt długotrwała. Wykorzystanie tej metody wspomaga rozwój przemysłu w kierunku automatyzacji procesów i optymalizacji produkcji. Pomiary odbywają się cyklicznie co umożliwia obserwację przemian zachodzących w procesie produkcyjnym i precyzyjnie określenie początku i końca przemiany, a także jej szybkości, co wpływa na optymalizację parametrów i kontrolę procesu.

## 1.2. Zasady działania spektroskopii Ramana

Podstawą zasad działania spektroskopii Ramana jest zjawisko rozpraszania światła [34, 35]. Zjawisko to opiera się o wzbudzenie oscylacji molekuly przez oświetlenie jej światłem o częstości  $\nu_0$  z zakresu NIR (780-1100 nm), Vis (380-780 nm) lub UV (200-380 nm) [16, 36]. Wzbudzenie molekuly fotonami wywołuje oddziaływanie cząsteczki z falą elektromagnetyczną, a skutkiem tego oddziaływania jest rozproszenie światła. Zjawisko rozpraszania światła jest efektem bardzo słabym, w przypadku rozpraszania Ramana pasma rozproszone są około milion razy mniej intensywne niż intensywność promieniowania wzbudzającego pochodzącego z monochromatycznego źródła światła. Stąd potrzeba stosowania intensywnych źródeł światła oraz czułych detektorów. Rozproszenie światła przez molekułę może zachodzić bez zmiany energii fotonu, wówczas określa się je jako rozpraszanie Rayleigha, natomiast jeśli zachodzi zmiana energii fotonu mówimy o rozpraszaniu ramanowskim. Rozpraszanie ramanowskie może przebiegać ze zmniejszeniem energii fotonu i przeniesieniem cząsteczki po oddziaływaniu z fotonem na wyższy poziom oscylacyjny, jest to tzw. składowa stokesowska rozpraszania Ramana, natomiast gdy energia fotonu ulega zwiększeniu wówczas mówimy o składowej antystokesowskiej rozpraszania Ramana. Schemat rozpraszania ramanowskiego dla składowej stokesowskiej przedstawiono na Rys. 2. Większość dostępnych technik pomiarowych umożliwia pomiar rozproszenia ramanowskiego dla części stokesowskiej widma ramanowskiego, część ta prezentowana jest w skali względnych wartości wyrażonych jako przesunięcie ramanowskie [ $\text{cm}^{-1}$ ] w zakresie od 0 do  $4000 \text{ cm}^{-1}$ . Taka prezentacja wyników jest tożsama z prezentacją oferowaną przez technikę spektroskopii w podczerwieni, co sprawia, że możliwe jest porównanie wyników tych dwóch komplementarnych metod spektroskopowych.



Rys. 2. Schemat ramanowskiego rozpraszania światła przez molekulę, gdzie  $h$ -stała Plancka,  $\nu$ -częstość promieniowania elektromagnetycznego

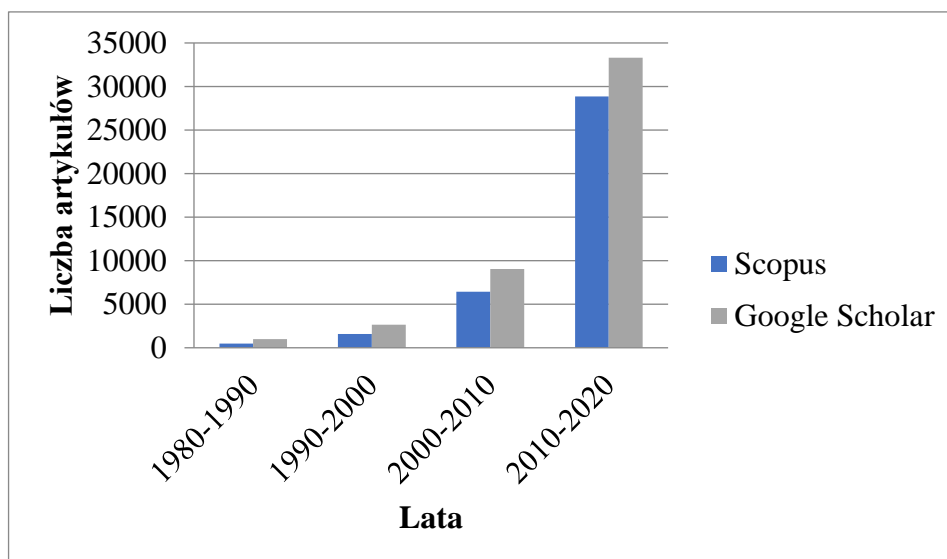
Wyniki pomiarów techniką spektroskopii ramanowskiej prezentowane są jako widma ramanowskie i zawierają zaszyfrowaną informację o strukturze molekularnej. Widma te pozwalają na identyfikację nieznannej substancji pod względem jakościowym i ilościowym, potwierdzenie obecności określonych ugrupowań atomów, wiązań, a także przemian jakie zachodzą podczas reakcji chemicznych [37]. Przejścia pomiędzy stanami energetycznymi zachodzące pod wpływem wzbudzenia fotonami zachodzą dla określonych energii powstających na skutek wibracji molekuł. Wibracje te są powiązane z grupami funkcyjnymi występującymi w badanej substancji i umożliwiają identyfikację cząsteczek.

## 2. SPEKTROSKOPIA RAMANA W ANALIZIE PROCESÓW PRODUKCYJNYCH I WŁAŚCIWOŚCI TLENKU TYTANU (IV)

Ze względu na wieloetapowość procesu przetwarzania surowca prowadzącego do wytworzenia tlenku tytanu (IV) kontrola jego wytwarzania bezpośrednio zaimplementowana w procesie produkcyjnym w pętli sprzężenia zwrotnego znacząco poprawia jakość produktu finalnego i ogranicza koszty związane z błędami produkcji, a także pozwala na modyfikację i kontrolę parametrów wytwarzania [14]. W szczególności ważnym etapem wytwarzania  $\text{TiO}_2$  jest kalcynacja prowadząca do przemiany struktury amorficznej w anataz i anatazu w rutil. Ze względu na wiele parametrów i zachodzących reakcji automatyczne sterowanie piecem do kalcynacji stanowi wyzwanie. Próby kontroli tego etapu podejmowano w oparciu o dyfrakcję promieni rentgenowskich (XRD), która umożliwia potwierdzenie przejścia fazy anatazu w rutil, czy też zmianę formy amorficznej w krystaliczną anatazu wraz z określeniem procentowej zawartości anatazu i rutilu w wytworzonym  $\text{TiO}_2$ . Metoda ta jest skuteczna i stanowiła podstawę kontroli procesu wytwarzania tlenku tytanu (IV) przez wiele lat. Zwiększanie produkcji wymaga jednak minimalizacji kosztu jednostkowego produkcji i lepszej kontroli nad procesem w celu zwiększenia wydajności i jakości produktu. Takie wymagania są niemożliwe do

spełnienia za pomocą XRD w związku z czym rozpoczęto opracowywanie systemu kontroli opartego o spektroskopię Ramana.

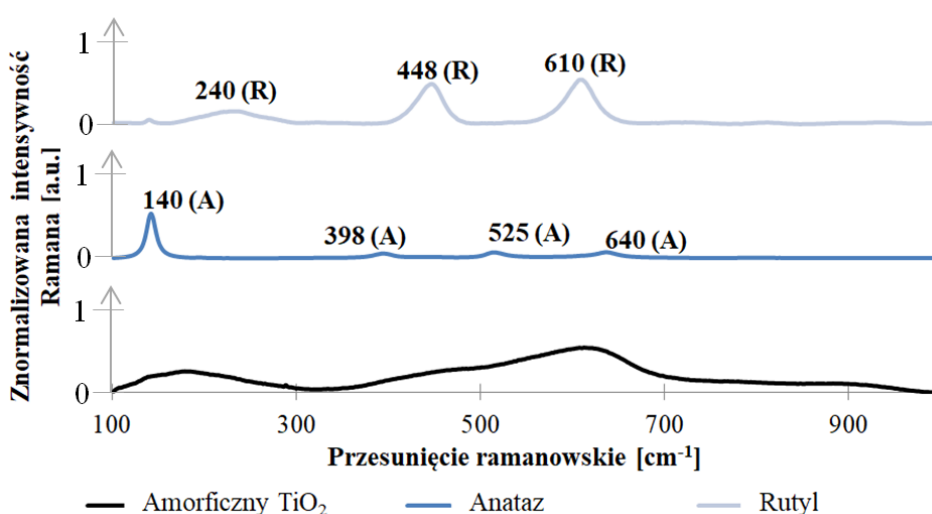
Zastosowanie spektroskopii Ramana przy charakteryzowaniu tlenku tytanu (IV) wzrosło na przestrzeni lat 1980-2020, co zaobserwowano na podstawie wzrastającej liczby artykułów odnalezionych na podstawie słów kluczy: *raman spectroscopy* – z ang. spektroskopia Ramana i *titanium dioxide* – z ang. ditlenek tytanu. Sumaryczną liczbę artykułów dla przedziałów lat 1980-1990, 1990-2000, 2000-2010 i 2010-2020 przedstawiono na Rys. 3. Przy wyszukiwaniu korzystano z popularnych baz do wyszukiwania artykułów naukowych Google Scholar i Scopus. W latach 1980-1990 liczba artykułów, w których wykorzystywano spektroskopię ramanowską w analizie  $\text{TiO}_2$  nie przekroczyła 1000 pozycji, w kolejnych latach liczba ta wzrastała aby osiągnąć w latach 2010-2020 liczbę bliską 30000 pozycji literaturowych.



Rys. 3. Liczba artykułów zawierających słowa *raman spectroscopy* – z ang. spektroskopia Ramana i *titanium dioxide* – z ang. ditlenek tytanu w latach 1980-2020 według baz danych Scopus i Google Scholar

W analizie procesu produkcyjnego  $\text{TiO}_2$  szczególną uwagę zwraca się na obserwacje przejścia fazy amorficznej w krystaliczną. Na Rys. 4. przedstawiono widma Ramanowskie uzyskane dla nanorurek ditlenku tytanu otrzymanych poprzez anodowanie podłoża tytanowego, a następnie jego wyżarzanie w temperaturach odpowiednio  $450^\circ\text{C}$  dla anatazu i  $650^\circ\text{C}$  dla rutylu, próbka amorficzna natomiast nie podlegała wyżarzaniu. Anataz i rutyl mają jedno pasmo wspólne przy przesunięciu ramanowskim  $140\text{ cm}^{-1}$ , mają także one charakterystyczne pasma. Pasma Ramana obserwowane przy  $398\text{ cm}^{-1}$  i  $640\text{ cm}^{-1}$  przypisane są aktywnym modom drgań  $B_{1g}$  i  $E_g$  [38, 39]. Pasma przy  $525\text{ cm}^{-1}$  stanowią

dublet modów  $A_{1g}$  i  $B_{1g}$ . Pasma te są charakterystyczne dla anatazu. Rutylowi zaś przypisuje się pasma Ramana przy  $448\text{ cm}^{-1}$  i  $610\text{ cm}^{-1}$  odpowiadające aktywnym modom wibracji  $E_g$  i  $A_{1g}$ . Na podstawie widm Ramana możliwe jest więc rozróżnienie uzyskanych form tlenku tytanu (IV) [40-47]. Możliwe jest także określenie zawartości anatazu w badanej próbce, a także określenie czystości produktu na każdym z etapów produkcji [48, 49]. Technika ramanowska jest więc niezwykle przydatna w kontroli procesu produkcji tlenku tytanu (IV).



Rys. 4. Widma Ramana  $TiO_2$  w formie amorficznej i krystalicznej anatazu i rutylu na przykładzie nanorurek ditlenku tytanu modyfikowanych termicznie wraz z oznaczeniem charakterystycznych pasm dla anatazu (A) i rutylu (R)

Na podstawie wyników spektroskopii ramanowskiej tlenku tytanu (IV) można więc obserwować zachodzące pod wpływem temperatury zmiany strukturalne bez ograniczeń temperaturowych [40, 50-54]. Co więcej obserwacja może dotyczyć różnych postaci próbki, zarówno cienkich warstw, jak i proszków czy nanocząstek. Metoda ta zaspokaja więc potrzeby współczesnej produkcji wymagającej obserwacji procesów w czasie rzeczywistym w odróżnieniu do stosowanej dotąd techniki XRD.

Kolejną grupą zastosowań spektroskopii Ramana poza analizą przemian strukturalnych  $TiO_2$  jest wykrywanie jego śladowych ilości jako np. dodatków do żywności czy też materiałów toksycznych [48, 49, 55, 56]. Takie zanieczyszczenia mogą znajdować się m.in. w mleku, ryżu czy cukrze, zawartość anatazu określa się również w próbkach archeologicznych [57]. Spektroskopia ramana jest metoda szybką i nie wymaga specjalnego przygotowania próbki, dając przy tym dokładny wynik, stąd ma przewagę nad innymi technikami analitycznymi przy wykrywaniu ilościowym substancji. Aparatura umożliwia pomiar poza laboratorium dzięki czemu zarówno przemysł jak i ośrodku kontrolują-

ce mogą wykonywać pomiary ilościowe bezpośrednio na badanym produkcie. Metoda ilościowa wymaga stworzenia krzywej kalibracyjnej na podstawie dostępnych próbek kalibracyjnych  $\text{TiO}_2$  [39]. Krzywą sporządza się wykonując pomiary znanych stężeń poszukiwanej substancji, a następnie tworzy się krzywą wzrastającej intensywności Ramana wraz z wzrastającą zawartością substancji i w ten sposób wyznacza się równanie krzywej pozwalające na podstawie intensywności Ramana wyznaczyć zawartość szukanej substancji w badanej próbce. Poza analizą ilościową spektroskopia Ramana jest przydatna w szybkich metodach jakościowych określania zawartości  $\text{TiO}_2$ , czy też określania stosunku anatazu do rutylu [58, 59]. Metodą tą można więc potwierdzić otrzymanie tlenku tytanu (IV), jego czystość i skład fazowy [60].

Tlenek tytanu (IV) posiada zdolność do adsorbowania substancji organicznych takich jak metanol, kwas mrówkowy, czy kwas fталowy [61]. Taka właściwość wykorzystywana jest przy projektowaniu półprzewodników, na powierzchni których osadzany jest  $\text{TiO}_2$ , a następnie przy pomocy spektroskopii Ramana możliwe jest określenie adsorpcji składników rozpuszczonych w roztworach elektrolitów [62]. Spektroskopia Ramana pozwala na szczegółową analizę  $\text{TiO}_2$  pod kątem jego właściwości półprzewodnikowych, co nie było możliwe przy użyciu konwencjonalnych metod badawczych [50, 63]. Badania przy użyciu spektroskopii ramanowskiej dostarczają bowiem informacji na temat energii pasma wzbronionego, zapewniają wgląd w stany elektronowe i przemiany fazowe materiałów na bazie tlenku tytanu (IV), co pozwala lepiej określić obszar zastosowań tego materiału i sposób jego produkcji. Badania nad absorpcją i reakcją związków chemicznych z  $\text{TiO}_2$  są szczególnie istotne w kontekście potencjalnie szkodliwego wpływu tlenku tytanu (IV) na zdrowie. Związek ten jako dodatek do żywności, leków czy też jako element implantów medycznych może bowiem reagować z otaczającym go środowiskiem, tworzyć kompleksy i niekorzystnie oddziaływać na organizm. Badanie procesów i reakcji jakie zachodzą przy kontakcie  $\text{TiO}_2$  z żywnością, składnikami krwi itp. możliwe jest dzięki zastosowaniu spektroskopii ramanowskiej i może dać odpowiedź na temat toksyczności tego powszechnie stosowanego tlenku i konsekwencji jakie przyniesie jego zastosowanie [64-78]. Badanie niekorzystnego oddziaływania  $\text{TiO}_2$  na organizm jest istotne i w ostatnim czasie wielu badaczy podejmuje się prób określenia jego wpływu i konsekwencji z tego płynących. Ma to związek z wzrastającym wykorzystaniem  $\text{TiO}_2$ , w tym w medycynie jako powłoki implantów medycznych, czy też składniki leków i biosensory [79-89].

## PODSUMOWANIE

Wzrastające wykorzystanie tlenku tytanu (IV) powoduje zwiększenie jego produkcji, co z kolei przyczynia się do poszukiwania technik analitycznych umożliwiających kontrolę procesu jego wytwarzania i właściwości. Spowodowało to zwiększenie wykorzystania spektroskopii Ramana przy kontroli procesu produkcyjnego oraz właściwości powstałego  $\text{TiO}_2$ . Technika ta umożliwia bowiem wykonywanie badań w czasie rzeczywistym, dzięki czemu proces produkcyjny podlega kontroli na każdym etapie, co daje korzyści ekonomiczne, czasowe i jakościowe. Próbkę do badań nie wymagają specjalnego przygotowania, pomiar jest szybki i nieniszczący, a badaniom podlegają zarówno ciała stałe,

jak i cieczy oraz gazy. W ramach pracy określono obszary zastosowania spektroskopii Ramana w procesach produkcyjnych i analizie właściwości tlenku tytanu (IV). Obszary te zidentyfikowano jako obserwacje przemian strukturalnych, badania ilościowe i jakościowe, w tym wykrywanie ilości śladowych  $\text{TiO}_2$  i określanie jego czystości oraz ocenę adsorpcji i reagowania tlenku tytanu (IV) z innymi substancjami. Zidentyfikowane możliwości zastosowania spektroskopii ramanowskiej wynikają z możliwości jakie daje ta technika badawcza, wymagań przy produkcji  $\text{TiO}_2$  i konieczności badań w kierunku jego potencjalnie niekorzystnych dla organizmu właściwości. Dotychczas stosowane techniki pomiarowe przy analizie procesu produkcyjnego tlenku tytanu (IV) były czasochłonne i zwykle odnosiły się do konkretnego etapu produkcji lub badania reprezentatywnej próbki materiału końcowego. Dzięki rozwojowi spektroskopii ramanowskiej wyparła ona metody takie jak spektroskopia w podczerwieni czy dyfrakcja promieni rentgenowskich stosowane przy analizie właściwości  $\text{TiO}_2$ , ze względu na możliwości wykonywania pomiarów w czasie rzeczywistym i większej ilości zwracanych danych niż w przypadku innych metod. Tlenek tytanu (IV) znajduje coraz więcej zastosowań stąd potrzeba opracowania sprawnej metody kontroli jego produkcji i właściwości, którą spełnia spektroskopia Ramana.

## LITERATURA

- [1] **Nischk M.** (2016) *Cienkie warstwy  $\text{TiO}_2$ : metoda otrzymywania, charakterystyka oraz zastosowania*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Chemiczny.
- [2] **Haider, A. J., Jameel, Z. N., & Al-Hussaini, I. H. M.** (2019). *Review on: Titanium Dioxide Applications*. Energy Procedia, 157, 17–29. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.159
- [3] **Gruszka, J., Malejko, J., & Godlewska-Żyłkiewicz, B.** (2019). *Nanocząstki tlenku tytanu (IV): zastosowanie w produktach użytkowych, badania właściwości i oznaczanie techniką spektrometrii mas z plazmą indukcyjnie sprzężoną pracującą w trybie pojedynczej cząstki*. Wiadomości Chemiczne.
- [4] **Kasza, T.** (2007) *Badanie właściwości fotokatalitycznych i charakterystyka fizykochemiczna nanokrystalicznych filmów  $\text{TiO}_2$  na podłożu ceramicznym*. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska. Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej.
- [5] **Kosmała, K., Szymańska, R.** (2016) *Nanocząstki tlenku tytanu (IV). otrzymywanie, właściwości i zastosowanie*. Polish. Kosmos 65.2, s. 235–245.
- [6] **Hass, G.** (1952). *Preparation, properties and optical applications of thin films of titanium dioxide*. Vacuum, 2(4), 331–345. doi:10.1016/0042-207x(52)93783-4
- [7] **Macak, J., Tsuchiya, H., Ghicov, A., Yasuda, K., Hahn, R., Bauer, S., Schmuki, P.** (2007)  *$\text{TiO}_2$  Nanotubes: Self-Organized Electrochemical Formation, Properties and Applications*. Current Opinion in Solid State and Materials Science 11, s. 3–18.

- [8] **Yang, Y.; Wang, X.; Li, L.** (2008) *Crystallization and Phase Transition of Titanium Oxide Nanotube Arrays*. Journal of the American Ceramic Society 91.2, p 632–635.
- [9] **Arkusz, K. Paradowska, E. Nycz, M. Krasicka-Cydzik, E.** (2018) *Influence of thermal modification and morphology of TiO<sub>2</sub> nanotubes on their electrochemical properties for biosensors applications*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(5), 3713-3721.
- [10] **Jędrzejewska, A. Pasik, K. Nycz, M. Arkusz, K.** (2021) *The Affinity for Dialysate Species of Thermally Modified Titania Nanotubes Under Static and Dynamic Conditions*. Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 23, no. 4, 1-21, ISSN: 1509-409X.
- [11] **Nycz, M. Paradowska, E. Arkusz, K. Pijanowska, D.G.** (2020) *Influence of geometry and annealing temperature in argon atmosphere of TiO<sub>2</sub> nanotubes on their electrochemical properties*, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 22, no. 1, p 165-177, ISSN: 1509-409X.
- [12] **Farrow, R. L., Mattern, P. L., & Nagelberg, A. S.** (1980). *Characterization of surface oxides by Raman spectroscopy*. Applied Physics Letters, 36(3), 212-214.
- [13] Kowalkińska, M., & Zielińska-Jurek, A. (2020). Różne oblicza nanostruktur tlenku tytanu (IV). Laboratorium, 1-14.
- [14] **Clegg, I. M., Everall, N. J., King, B., Melvin, H., & Norton, C.** (2001). *On-line analysis using Raman spectroscopy for process control during the manufacture of titanium dioxide*. Applied Spectroscopy, 55(9), 1138-1150.
- [15] **Felske, A., & Plieth, W. J.** (1989). *Raman spectroscopy of titanium dioxide layers*. Electrochimica Acta, 34(1), 75-77.
- [16] Praca zbiorowa pod redakcją **Kamili Małek**: *Spektroskopia oscylacyjna od teorii do praktyki*. PWN, Wydanie I, Warszawa 2016, ISBN 978-83-01-18826-9.
- [17] **Ng, L. M., & Simmons, R.** (1999). *Infrared spectroscopy*. Analytical chemistry, 71(12), 343-350.
- [18] **Adar, F., Geiger, R., & Noonan, J.** (1997). *Raman Spectroscopy for Process/Quality Control*. Applied Spectroscopy Reviews, 32(1-2), 45–101. doi:10.1080/05704929508001133
- [19] **De Beer, T., Burggraave, A., Fonteyne, M., Saerens, L., Remon, J. P., & Vervaet, C.** (2011). *Near infrared and Raman spectroscopy for the in-process monitoring of pharmaceutical production processes*. International journal of pharmaceuticals, 417(1-2), 32-47.
- [20] **Golabgir, A., & Herwig, C.** (2016). *Combining mechanistic modeling and Raman spectroscopy for real-time monitoring of fed-batch Penicillin production*. Chemie Ingenieur Technik, 88(6), 764-776.
- [21] **Voss, J. P., Mittelheuser, N. E., Lemke, R., & Luttmann, R.** (2017). *Advanced monitoring and control of pharmaceutical production processes with Pichia pastoris by using Raman spectroscopy and multivariate calibration methods*. Engineering in life sciences, 17(12), 1281-1294.



- [22] **Sivakesava, S., Irudayaraj, J., & Demirci, A.** (2001). *Monitoring a bioprocess for ethanol production using FT-MIR and FT-Raman spectroscopy*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 26, 185-190.
- [23] **Rodriguez, R., Vargas, S., Estevez, M., Quintanilla, F., Trejo-Lopez, A., & Hernández-Martínez, A. R.** (2013). *Use of Raman spectroscopy to determine the kinetics of chemical transformation in yogurt production*. *Vibrational Spectroscopy*, 68, 133-140.
- [24] **Maksymiec, M., Stasiak, D. M., & Libera, J.** (2015). *Niedestrukcyjne techniki w kontroli jakości wyrobów mięsnych*. *Bezpieczeństwo zdrowotne żywności Aspekty mikrobiologiczne, chemiczne i ocena towaroznawcza*, 145.
- [25] **Abrahamsson, J., Andreasson, E., Hansson, N., Sandström, D., Wennberg, E., Maréchal, M., & Martinelli, A.** (2015). *A Raman spectroscopic approach to investigate the production of biodiesel from soybean oil using 1-alkyl-3-methylimidazolium ionic liquids with intermediate chain length*. *Applied Energy*, 154, 763-770.
- [26] **Jędrychowska, S.** (2012). *Możliwości wykorzystania spektroskopii ramanowskiej w branży naftowej*. *Nafta-Gaz*.
- [27] **Nykiel, P.** (2013). *Spektroskopia Ramana: nowoczesna technika w diagnostyce medycznej i analizie biochemicznej*. *Prospects in Pharmaceutical Sciences*, 11(4), 27-36.
- [28] **Świętnicka, S.** (2021). *Zastosowanie spektroskopii Ramana w diagnostyce medycznej*.
- [29] **Michalska, A.** (2017). *Zastosowanie spektroskopii Ramana w badaniu niebieskich lakierów samochodowych: ocena wartości dowodowej widm w podejściu klasycznym oraz z zastosowaniem metod chemometrycznych i statystycznych*.
- [30] **Chlebda, D. K.** (2016). *Charakterystyka powierzchni materiałów nanostrukturalnych z użyciem powierzchniowo wzmocnionej spektroskopii ramana*. *Technical Issues*, (1), 8-13.
- [31] **Lisińska-Czekaj, A., Orkisz, T., Orkisz, J., & Czekaj, D.** (2015). *Zastosowanie spektroskopii Ramana do charakterystyki warstw BST wytworzonych metodą zol-żel na podłożach metalowych*. *Materiały Ceramiczne*, 67(1), 48-55.
- [32] **Szulc, A., Zorenko, Y., & Mosińska, L.** (2012). *Zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej i spektroskopii Ramana do badań warstw diamentowych o różnej jakości*. *Przemysł Chemiczny*, 91(1), 75-79.
- [33] **Stańczuk, M., & Runka, T.** (2016). *Zastosowanie spektroskopii Ramana do analizy i identyfikacji szminek*. *LAB Laboratoria, Aparatura, Badania*, 21(3), 6-13.
- [34] **Lyon, L. A., Keating, C. D., Fox, A. P., Baker, B. E., He, L., Nicewarner, S. R., ... & Natan, M. J.** (1998). *Raman spectroscopy*. *Analytical Chemistry*, 70(12), 341-362.
- [35] **Long, D. A.** (1977). *Raman spectroscopy*. New York, 1.
- [36] **Szklarzewicz, J., & Migdał-Mikuli, A.** (2005). *Absorpcyjna spektroskopia elektronowa*.

- [37] **Giles, J. H., Gilmore, D. A., & Denton, M. B.** (1999). *Quantitative analysis using Raman spectroscopy without spectral standardization*. *Journal of Raman Spectroscopy*, 30(9), 767-771.
- [38] **O. Frank, M. Zukalova, B. Laskova, J. Kürti, J. Koltai, L. Kavan,** *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2012, 14, 14567–14572.
- [39] **Pelletier, M. J.** (2003). *Quantitative analysis using Raman spectrometry*. *Applied spectroscopy*, 57(1), 20A-42A.
- [40] **Balachandran, U. G. E. N., & Eror, N. G.** (1982). *Raman spectra of titanium dioxide*. *Journal of Solid State Chemistry*, 42(3), 276-282.
- [41] **Cheng, H., Ma, J., Zhao, Z., & Qi, L.** (1995). *Hydrothermal preparation of uniform nanosize rutile and anatase particles*. *Chemistry of Materials*, 7(4), 663-671.
- [42] **Castrejón-Sánchez, V. H., López, R., Ramón-González, M., Enríquez-Pérez, Á., Camacho-López, M., & Villa-Sánchez, G.** (2018). *Annealing control on the anatase/rutile ratio of nanostructured titanium dioxide obtained by sol-gel*. *Cry-stals*, 9(1), 22.
- [43] **Castrejón-Sánchez, V. H., Camps, E., & Camacho-López, M.** (2014). *Quantification of phase content in TiO<sub>2</sub> thin films by Raman spectroscopy*. *Superficies y vacío*, 27(3), 88-92.
- [44] **Sreekantan, S., Hazan, R., & Lockman, Z.** (2009). *Photoactivity of anatase–rutile TiO<sub>2</sub> nanotubes formed by anodization method*. *Thin solid films*, 518(1), 16-21.
- [45] **Loan, T. T., Huong, V. H., Huyen, N. T., Van Quyet, L., Bang, N. A., & Long, N. N.** (2021). *Anatase to rutile phase transformation of iron-doped titanium dioxide nanoparticles: The role of iron content*. *Optical Materials*, 111, 110651.
- [46] **Oh, S. M., & Ishigaki, T.** (2004). *Preparation of pure rutile and anatase TiO<sub>2</sub> nanopowders using RF thermal plasma*. *Thin Solid Films*, 457(1), 186-191.
- [47] **Nolan, N. T., Seery, M. K., & Pillai, S. C.** (2009). *Spectroscopic investigation of the anatase-to-rutile transformation of sol–gel-synthesized TiO<sub>2</sub> photocatalysts*. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(36), 16151-16157.
- [48] **Murad, E.** (1997). *Identification of minor amounts of anatase in kaolins by Raman spectroscopy*. *American Mineralogist*, 82(1-2), 203-206.
- [49] **Lim, Jin-Hee & Bae, Dongryeoul & Fong, Andrew.** (2018). *Titanium Dioxide in Food Products: Quantitative Analysis Using ICP-MS and Raman Spectroscopy*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 66. 10.1021/acs.jafc.8b06571.
- [50] **Tanabe, I., & Ozaki, Y.** (2016). *Far- and deep-ultraviolet spectroscopic investigations for titanium dioxide: electronic absorption, Rayleigh scattering, and Raman spectroscopy*. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(33), 7706–7717. doi:10.1039/c6tc02368a
- [51] **Chang, H., & Huang, P. J.** (1998). *Thermo-Raman studies on anatase and rutile*. *Journal of Raman spectroscopy*, 29(2), 97-102.

- [52] **Hu, Y., Tsai, H. L., & Huang, C. L.** (2003). *Effect of brookite phase on the anatase–rutile transition in titania nanoparticles*. *Journal of the European Ceramic Society*, 23(5), 691-696.
- [53] **Ohsaka, T., Yamaoka, S., & Shimomura, O.** (1979). Effect of hydrostatic pressure on the Raman spectrum of anatase (TiO<sub>2</sub>). *Solid State Communications*, 30(6), 345-347.
- [54] **Rezaee, M., Khoie, S. M. M., & Liu, K. H.** (2011). The role of brookite in mechanical activation of anatase-to-rutile transformation of nanocrystalline TiO<sub>2</sub>: An XRD and Raman spectroscopy investigation. *CrystEngComm*, 13(16), 5055-5061.
- [55] **Zhao, B.; Cao, X.; De La Torre-Roche, R.; Tan, C.; Yang, T.; White, J. C.; Xiao, H.; Xing, B.; He, L.** A green, facile, and rapid method for microextraction and Raman detection of titanium dioxide nanoparticles from milk powder. *RSC Adv.* 2017, 7, 21380–21388, DOI: 10.1039/C7RA02520C
- [56] **Tan, C.; Zhao, B.; Zhang, Z.; He, L.** Rapid detection of TiO<sub>2</sub> (E171) in table sugar using Raman spectroscopy. *Food Addit. Contam., Part A* 2016, 34, 183–191, DOI: 10.1080/19440049.2016.1263877
- [57] **Middleton, A. P., Edwards, H. G. M., Middleton, P. S., & Ambers, J.** (2005). Identification of anatase in archaeological materials by Raman spectroscopy: implications and interpretation. *Journal of Raman Spectroscopy: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering*, 36(10), 984-987.
- [58] **Li, J., Zhang, L., Zhu, F., Song, Y., Yu, K., & Zhao, Y.** (2023). Rapid qualitative detection of titanium dioxide adulteration in persimmon icing using portable Raman spectrometer and Machine learning. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 290, 122221.
- [59] **Jasinski, J. J., Lubas, M., Suchorab, K., Gawęda, M., Kurpaska, L., Brykała, M., ... & Jagielski, J.** (2022). *Qualitative and semi-quantitative phase analysis of TiO<sub>2</sub> thin layers by Raman imaging*. *Journal of Molecular Structure*, 1260, 132803.
- [60] **Arsov, L. D., Kormann, C., & Plieth, W.** (1991). *Electrochemical synthesis and in situ Raman spectroscopy of thin films of titanium dioxide*. *Journal of Raman spectroscopy*, 22(10), 573-575.
- [61] **Lana-Villarreal, T., Pérez, J. M., & Gómez, R.** (2004). *Surface enhanced Raman spectroscopy for adsorption studies on semiconductor nanostructured films*. *Surface science*, 572(2-3), 329-336.
- [62] **Lana-Villarreal, T., Pérez, J. M., & Gómez, R.** (2006). *Adsorption studies on titanium dioxide by means of Raman spectroscopy*. *Comptes Rendus Chimie*, 9(5-6), 806-816.
- [63] **Ekoi, E. J., Gowen, A., Dorrepaal, R., & Dowling, D. P.** (2019). *Characterisation of titanium oxide layers using Raman spectroscopy and optical profilometry: Influence of oxide properties*. *Results in Physics*, 12, 1574-1585.
- [64] **Cao, X., Ma, C., Gao, Z., Zheng, J., He, L., McClements, D. J., & Xiao, H.** (2016). *Characterization of the interactions between titanium dioxide nanoparti-*

- cles and polymethoxyflavones using surface-enhanced Raman spectroscopy*. Journal of agricultural and food chemistry, 64(49), 9436-9441.
- [65] **Kim, K. T., Eo, M. Y., Nguyen, T. T. H., & Kim, S. M.** (2019). *General review of titanium toxicity*. International journal of implant dentistry, 5(1), 1-12.
- [66] **Czajka, M., Sawicki, K., Sikorska, K., Popek, S., Kruszewski, M., & Kapka-Skrzypczak, L.** (2015). *Toxicity of titanium dioxide nanoparticles in central nervous system*. Toxicology in vitro, 29(5), 1042-1052.
- [67] **Chen, J., Dong, X., Zhao, J., & Tang, G.** (2009). *In vivo acute toxicity of titanium dioxide nanoparticles to mice after intraperitoneal injection*. Journal of applied toxicology, 29(4), 330-337.
- [68] **Wang, Y., Chen, Z., Ba, T., Pu, J., Chen, T., Song, Y., ... & Jia, G.** (2013). *Susceptibility of young and adult rats to the oral toxicity of titanium dioxide nanoparticles*. Small, 9(9-10), 1742-1752.
- [69] **Jia, X., Wang, S., Zhou, L., & Sun, L.** (2017). *The potential liver, brain, and embryo toxicity of titanium dioxide nanoparticles on mice*. Nanoscale research letters, 12, 1-14.
- [70] **Baranowska-Wójcik, E., Szwajgier, D., Oleszczuk, P., & Winiarska-Mieczan, A.** (2020). *Effects of titanium dioxide nanoparticles exposure on human health—a review*. Biological trace element research, 193, 118-129.
- [71] **Shakeel, M., Jabeen, F., Qureshi, N. A., & Fakhr-e-Alam, M.** (2016). *Toxic effects of titanium dioxide nanoparticles and titanium dioxide bulk salt in the liver and blood of male Sprague-Dawley rats assessed by different assays*. Biological trace element research, 173, 405-426.
- [72] **Skocaj, M., Filipic, M., Petkovic, J., & Novak, S.** (2011). *Titanium dioxide in our everyday life; is it safe?*. Radiology and oncology, 45(4), 227.
- [73] **Federici, G., Shaw, B. J., & Handy, R. D.** (2007). *Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): gill injury, oxidative stress, and other physiological effects*. Aquatic toxicology, 84(4), 415-430.
- [74] **Hong, F., Yu, X., Wu, N., & Zhang, Y. Q.** (2017). *Progress of in vivo studies on the systemic toxicities induced by titanium dioxide nanoparticles*. Toxicology research, 6(2), 115-133.
- [75] **Younes, M., Aquilina, G., Castle, L., Engel, K. H., Fowler, P., ... & Wright, M.** (2021). *Safety assessment of titanium dioxide (E171) as a food additive*. Efsa Journal, 19(5), e06585.
- [76] **Chen, J., Dong, X., Xin, Y., & Zhao, M.** (2011). *Effects of titanium dioxide nanoparticles on growth and some histological parameters of zebrafish (*Danio rerio*) after a long-term exposure*. Aquatic Toxicology, 101(3-4), 493-499.
- [77] **Liang, G., Pu, Y., Yin, L., Liu, R., Ye, B., Su, Y., & Li, Y.** (2009). *Influence of different sizes of titanium dioxide nanoparticles on hepatic and renal functions in rats with correlation to oxidative stress*. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 72(11-12), 740-745.

- [78] **Zhang, X., Li, W., & Yang, Z.** (2015). *Toxicology of nanosized titanium dioxide: an update*. *Archives of toxicology*, 89, 2207-2217.
- [79] **Ziental, D., Czarczynska-Goslinska, B., Mlynarczyk, D. T., Glowacka-Sobotta, A., Stanisiz, B., Goslinski, T., & Sobotta, L.** (2020). *Titanium dioxide nanoparticles: prospects and applications in medicine*. *Nanomaterials*, 10(2), 387.
- [80] **Besinis, A., Hadi, S. D., Le, H. R., Tredwin, C., & Handy, R. D.** (2017). *Anti-bacterial activity and biofilm inhibition by surface modified titanium alloy medical implants following application of silver, titanium dioxide and hydroxyapatite nanocoatings*. *Nanotoxicology*, 11(3), 327-338.
- [81] **Çeşmeli, S., & Biray Avci, C.** (2019). *Application of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles in cancer therapies*. *Journal of drug targeting*, 27(7), 762-766.
- [82] **Pawlik, A.** (2019). *Modyfikowane nanoporowate warstwy anodowego tlenku tytanu (IV): charakterystyka i zastosowania biomedyczne* (Doctoral dissertation).
- [83] **Kida, K.** (2022). *Właściwości antybakteryjne modyfikowanego nanostrukturalnego tlenku tytanu (IV)*.
- [84] **Pawlik, A.** (2014). *Uwalnianie leków z nanoporowatego TiO<sub>2</sub>*.
- [85] **Blake, D. M., Maness, P. C., Huang, Z., Wolfrum, E. J., Huang, J., & Jacoby, W. A.** (1999). *Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells*. *Separation and purification methods*, 28(1), 1-50.
- [86] **Raja, G., Cao, S., Kim, D. H., & Kim, T. J.** (2020). *Mechanoregulation of titanium dioxide nanoparticles in cancer therapy*. *Materials Science and Engineering: C*, 107, 110303.
- [87] **Thurn, K. T., Arora, H., Paunesku, T., Wu, A., Brown, E. M., Doty, C., ... & Woloschak, G.** (2017). *Endocytosis of titanium dioxide nanoparticles in prostate cancer PC-3M cells*. In *Nanomedicine in Cancer* (pp. 441-460). Jenny Stanford Publishing.
- [88] **Wang, K., Jin, H., Song, Q., Huo, J., Zhang, J., & Li, P.** (2021). *Titanium dioxide nanotubes as drug carriers for infection control and osteogenesis of bone implants*. *Drug Delivery and Translational Research*, 11(4), 1456-1474.
- [89] **Hamlekhan, A., Sinha-Ray, S., Takoudis, C., Mathew, M. T., Sukotjo, C., Yarin, A. L., & Shokuhfar, T.** (2015). *Fabrication of drug eluting implants: study of drug release mechanism from titanium dioxide nanotubes*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(27), 275401.

# **INŻYNIERIA WSPÓLBIEŻNA W PRZEBIEGU PROCESU PRODUKCYJNEGO W WYBRANYM PRZEDSIĘBIORSTWIE**

## **1.0 WPROWADZENIE**

Przedsiębiorstwa produkcyjne znalazły się w bardzo trudnej sytuacji spowodowanej okresem pandemii Covid-19. Wymusiło to szukanie we wszystkich możliwych płaszczyznach redukcji kosztów. Wzrastająca konkurencyjność powoduje, że przedsiębiorstwa muszą stale reagować na wszelkie zmiany w ich branży. Zdobyć przewagi konkurencyjnej można osiągnąć poprzez modernizację zakładów produkcyjnych, ich rozbudowę, ciągłe podnoszenie kwalifikacji pracowników na wszystkich szczeblach czy też optymalizację procesu produkcyjnego.

Od dawna wiadomo, że zleceniodawcom zależy na tym, aby otrzymane produkty były najwyższej jakości, wykonane w jak najkrótszym czasie oraz po możliwie najniższym koszcie. Powoduje to, że redukcja kosztów nie może odbywać się jednocześnie ze zmniejszeniem jakości wyrobów, czyli np. zamianą komponentów wykonanych z wysokiej jakości materiałów na zamienniki gorszej jakości. Może to przyczynić się do zwiększenia liczby reklamacji otrzymanych przez firmę, a co za tym idzie obniżeniem wiarygodności, renomy firmy i tym samym obniżenie konkurencyjności. Dlatego w dzisiejszych czasach przedsiębiorstwa produkcyjne starają się optymalizować proces wytwórczy, aby w jak największym stopniu skrócić czas produkcji.

Powszechnie stosowanymi metodami pozwalającymi na zarządzanie procesem produkcyjnym jest harmonogram Gantta oraz metody sieciowe, które przedstawiają relacje progresywne. Nie pozwalają one jednak na przedstawienie wszystkich zależności występujących pomiędzy poszczególnymi zadaniami oraz nie służą do optymalizacji, lecz tylko do graficznego przedstawienia procesu produkcyjnego. Naukowcy wykorzystując algorytmy ewolucyjne oraz sztuczną inteligencję w ujawnieniu inżynierii współbieżnej opracowali metodę pozwalającą optymalizować przedsięwzięcia za pomocą macierzy. Macierz sprzężeń (ang. Design Structure Matrix, DSM) pozwala przedstawić wszystkie relacje pomiędzy zadaniami oraz ustawić je w taki sposób, aby zoptymalizować według jednego z wybranych kryteriów: czas, koszt, sprzężenia zwrotne. Zastosowanie macierzy pozwoliło na przejrzyste zaprezentowanie zadań i połączeń występujących między nimi oraz łatwe nanoszenie zmian.

Celem publikacji jest zastosowanie omawianej metody do zmniejszenia kosztów, skrócenia czasu oraz ograniczenia liczby sprzężeń zwrotnych występujących podczas

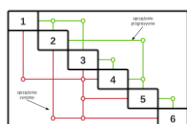
realizacji złożonych zadań częściowych w projekcie. Do optymalizacji wielokryterialnej wybrano rzeczywisty przebieg procesu produkcyjnego w firmie produkcyjnej. Wykorzystane zostaną metody sieciowe, belkowa oraz macierzowa (DSM).

## 1.1. Charakterystyka metody DESIGN STRUCTURE MATRIX -DSM

Badania nad zarządzaniem złożonymi projektami w oparciu o macierze przeszły długą drogę. Pierwsza publikacja o DSM, której autorem był Donald Steward powstała w 1981 roku [10]. Zapoczątkowało to analizowanie procesu produkcyjnego z wykorzystaniem macierzy sprzężeń. Design Structure Matrix (DSM) umożliwia analizę i optymalizację wszystkich zależności pomiędzy zadaniami.

DSM stała się popularnym sposobem modelowania procesu produkcyjnego w wielu dziedzinach badań oraz praktyki. Podstawowymi korzyściami z jej wykorzystywania jest prostota i zwięzłość prezentacji, a pogłębiona analiza może ukazać ważne wzorce w strukturze projektu [1, 2].

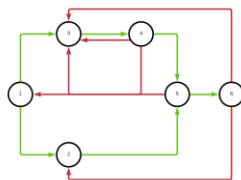
DSM (rys. 2.1) przyjmuje postać macierzy kwadratowej o rozmiarach  $m \times m$ . Linie przedstawiają relacje pomiędzy poszczególnymi zadaniami, poziome są równoznaczne z wyjściem z czynności, natomiast linie pionowe z wejściem [9]. Znaczenie ma również pozycja linii w stosunku do przekątnej, linie powyżej głównej przekątnej, zaznaczone na zielono, ukazują sprzężenia progresywne, natomiast linie poniżej przekątnej, zaznaczone na czerwono, sprzężenia zwrotne.



Rys. **Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..1** Kwadratowa macierz sprzężeń

Źródło: opracowanie własne.

DSM w porównaniu do tradycyjnej metody sieciowej pozwala uwzględnić i zwizualizować wszystkie zależności pomiędzy zadaniami wraz ze sprzężeniami zwrotnymi w prostszy sposób niż tradycyjna metoda sieciowa (rys. 2.2).



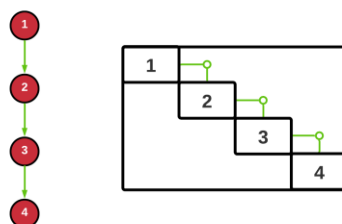
Rys. **Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..2** Przykład metody sieciowej z uwzględnieniem sprzężeń zwrotnych

Źródło: opracowanie własne.

Przy bardziej skomplikowanych projektach, odczytanie wielu relacji może być problematyczne, dlatego wykorzystuje się do tego wizualizację w postaci macierzy, która pozwala na przejrzyste przedstawienie wielu bardzo skomplikowanych relacji uwzględniających wiele iteracji.

Aby prawidłowo interpretować model, należy zapoznać się z wszystkimi możliwymi strukturami wymiany informacji pomiędzy poszczególnymi zadaniami. Zaprezentowano te zależności za pomocą metody sieciowej oraz DSM.

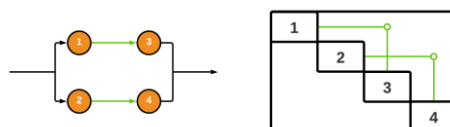
W pierwszej kolejności pokazano sekwencyjną wymianę informacji (rys. 2.3) pomiędzy czynnościami 1, 2, 3, 4. Rozważono hipotetyczny przykład współpracy studenta i promotora piszących wspólnie artykuł do renomowanego czasopisma. W przypadku wymiany informacji sekwencyjnej, pierwszą część pisze student, następnie przekazuje ją promotorowi, który pisze drugą część pracy. Następnie przekazuje on pracę z powrotem do studenta, który pisze trzecią część pracy, a następnie oddaje ją promotorowi, który publikuje pracę.



Rys. **Błąd!** W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu...3 Przykłady realizacji sekwencyjnej - model sieciowy oraz DSM

Źródło: opracowanie własne.

Kolejnym rodzajem wymiany informacji jest realizacja równoległa (rys. 2.4). Przedstawiając to na przykładzie studenta i promotora, wyglądałoby to następująco. Student i promotor w tym samym czasie piszą połowę pracy, następnie łączą ją w całość i publikują.



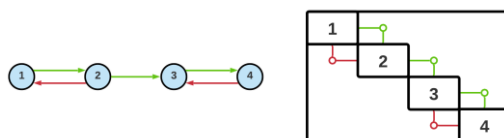
Rys. **Błąd!** W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu...4 Przykłady realizacji równoległej - model sieciowy oraz DSM

Źródło: opracowanie własne.

Ostatnim rodzajem wymiany informacji jest realizacja współbieżna (rys. 2.5). Współbieżność polega na równoczesnym wykonywaniu czynności, jednocześnie ze stałą wymianą informacji pomiędzy dwoma zadaniami. Przekładając to na przykład - student



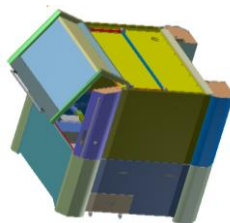
i promotor - piszą publikacje równoległe, stale się komunikując i wymieniając informacje pomiędzy sobą.



*Rys. Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..5 Przykłady realizacji współbieżnej - model sieciowy oraz DSM*  
*Źródło: opracowanie własne.*

## 2. REPREZENTACJA PRZEBIEGU ORYGINALNEGO PROCESU PRODUKCYJNEGO W WYBRANEJ FIRMIE PRODUKCYJNEJ ZA POMOCĄ DSM

Przedsiębiorstwo produkcyjne specjalizuje się w kształtowaniu blachy na zimno. Głównym asortymentem produkcyjnym firmy są skrzynki elektryczne oraz skomplikowane obudowy do instalacji siłowych. Spośród asortymentu produkcyjnego firmy, do przeprowadzenia analizy, wybrano obudowę instalacji elektrycznej (rys. 3.1).



*Rys. Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..6 Obudowa części elektrycznych*

*Źródło: Wewnętrzna dokumentacja firmy EURO-BOX sp. z o.o. [11]*

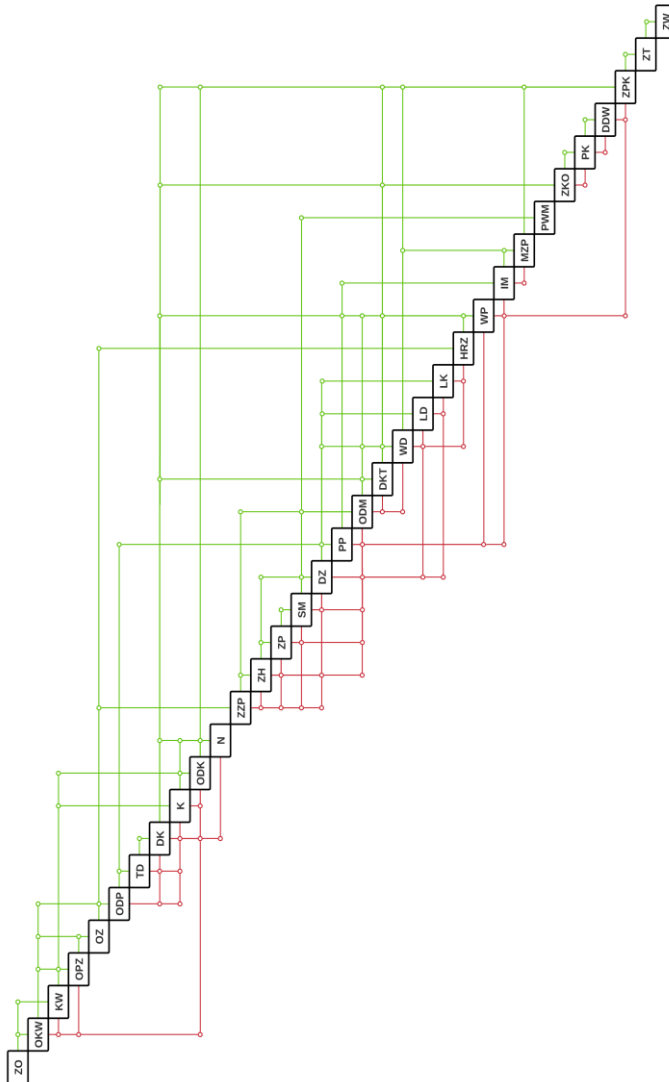
Przy wykorzystaniu autorskiego programu MAG PROJECT zaprojektowana została macierz sprzężeń bazująca na zbudowanej i opisanej poniżej tabeli, przedstawiającej nazwę czynności, czas, koszt oraz sprzężenia. Tabelę 3.1 sporządzono przy współudziale pracowników oddziału planowania, konstrukcyjnego, technologicznego, magazynowego, produkcyjnego oraz Prezesa Zarządu [12, 13].

*Tab. Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..1* Sekwencja realizacji produkcji dla wybranego produktu

Źródło: opracowanie własne.

Nazwa	Skrót	Czas [j.u.]	Koszt [j.u.]	Sprzężenia
Zapytanie ofertowe	ZO	1	30	-
Opracowanie koncepcji wstępnej	OKW	8	240	1, 3, 4, 10
Kalkulacja wstępna	KW	2	90	1
Opinia Prezesa Zarządu	OPZ	1	100	2,3
Otwarcie zlecenia	OZ	1	30	2, 4
Opracowanie dokumentacji prototypowej	ODP	4	180	2, 5, 8, 9
Tłumaczenie dokumentacji	TD	3	150	6, 8, 9
Dokumentacja konstrukcyjna	DK	200	16000	7, 9, 10, 11
Kalkulacja	K	32	2240	3, 10
Oferta dla klienta	ODK	3	90	3, 9
Negocjacje	N	17	1050	8, 9, 10
Zatwierdzenie zamówienia na prototyp	ZZP	2	80	5, 13, 14, 15, 16
Zlecenie handlowe	ZH	1	30	12, 14, 16, 18
Zlecenie produkcyjne	ZP	1	30	13, 15, 18
Stan magazynowy	SM	1	20	14, 16, 18
Dział zaopatrzeniowy	DZ	1	20	13, 15, 18, 21, 22
Projekt prototypu	PP	5	200	6, 18, 24, 25
Opracowanie drzewa materiałowego	ODM	2	60	12, 15, 16, 19, 20
Dokumentacja – karty technologiczne	DKT	6	180	8, 18
Wykonanie detali	WD	79	6320	16, 18, 19, 21, 23
Lista dostawców	LD	1	25	16, 22
Lista kooperacji	LK	2	50	16, 23
Akceptacja harmonogramu realizacji zlecenia	HRZ	2	60	5
Wykonanie prototypu	WP	92	10480	8, 17, 18, 19, 23, 25
Instrukcja montażu	IM	24	1680	17, 26
Montaż zespołów i podzespołów	MZP	37	2960	20, 25
Przekazanie wytycznych do magazynu	PWM	2	70	15
Zebrań kierowników oddziałów	ZKO	1	60	8, 19, 29
Protokół końcowy	PK	2	60	28, 30
Dokumentacja do wysyłki	DDW	2	60	29, 31
Zatwierdzenie prototypu przez klienta	ZPK	3	90	8, 10, 19, 20, 26
Zamówienie transportu	ZT	1	25	31
Załadunek i wysyłka	ZW	3	140	32

Dane z tabeli 3.1 pozwalają na zbudowanie macierzy sprzężeń, która w sposób graficzny przedstawia przebieg procesu produkcyjnego wraz z powiązaniem między jego zadaniami (rys.3.2).



Rys. **Błąd!** W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..7 Macierz sprzężeń przed optymalizacją  
Źródło: opracowanie własne.

Macierz przedstawiona na rysunku 3.2 odwzorowuje wszystkie połączenia pomiędzy 33 zadaniami. W tabeli 3.2 przedstawiono informacje na temat kosztu czasu oraz liczby sprzężeń zwrotnych. Przyjęto wagę realizacji iteracji równą 0,3, ponieważ z uśrednionych danych firmy wynika, że każda ponowna realizacja zadania znajdującego się wewnątrz sprzężenia zwrotnego zajmuje około 30% czasu oraz kosztu.

Przeprowadzenie jakiegokolwiek analizy na podstawie powyższej macierzy jest prawie niemożliwe. Obieg informacji jest bardzo chaotyczny i nieregularny. Występuje również wiele pętli iteracyjnych oraz sprzężeń zwrotnych wraz z ich skrzyżowaniami, które powodują kilkukrotne powtarzanie tej samej czynności. Próba opisanego logicznego przebiegu procesu produkcyjnego na podstawie powyższej macierzy (rys. 3.2) mija się z celem. Powodem tego jest planowanie procesu produkcyjnego w firmie jedynie za pomocą tradycyjnych metod nie uwzględniających wszystkich możliwości obiegu informacji. Dopiero zapoznanie się z nowymi metodami planowania produkcji wpłynie na zmianę podejścia do analizowania procesu produkcyjnego.

*Tab. Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..2 Czas, koszty oraz sprzężenia zwrotne procesu produkcyjnego przed optymalizacją. Źródło: opracowanie własne.*

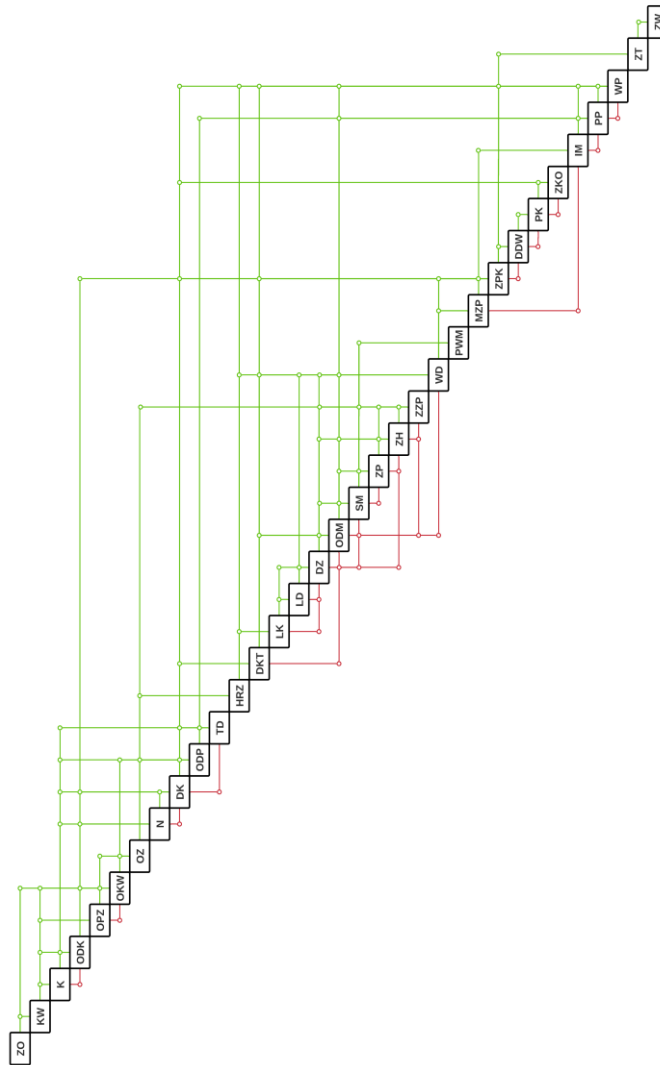
Nazwa	Jednostka (j.u.)
Czas całkowity	1 433
Koszt całkowity	118 645
Czas sprzężeń progresywnych	542
Koszt sprzężeń progresywnych	42 900
Czas sprzężeń zwrotnych	891
Koszt sprzężeń zwrotnych	75 745
Liczba sprzężeń zwrotnych	40

Z uwagi na fakt, że macierz nie jest zoptymalizowana, a jej struktura jest chaotyczna, wnikliwa analiza zostanie przeprowadzona w kolejnym podrozdziale, który będzie obejmował swym zakresem zoptymalizowaną postać macierzy.

## 2.1 Reprezentacja przebiegu procesu produkcyjnego po optymalizacji za pomocą macierzy sprzężeń

Za pomocą autorskiego programu MAG PROJECT bazującego na algorytmie ewolucyjnym, działającym podobnie do metody z rozdziału 2, zoptymalizowano macierz wejściową z rysunku 3.2.

W nowej zoptymalizowanej macierzy (rys. 4.1), można zauważyć, że liczba sprzężeń zwrotnych zmalała prawie o połowę. Jest to wynik, do którego dążono. Zgodnie z metodą optymalizacji poprzez sekwencjonowanie rozumie się zmniejszenie liczby sprzężeń zwrotnych do tego stopnia, aby osiągnąć jak najkrótszy czas oraz jak najmniejszy koszt. Wszystkie relacje pomiędzy zadaniami zostały zachowane, lecz część sprzężeń zwrotnych zostało przekształconych na sprzężenia progresywne w wyniku zmiany kolejności zadań na przekątnej macierzy.



Rys. *Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu.*8 Macierz sprzężeń po optymalizacji

Źródło: opracowanie własne.

Dla macierzy z rysunku 4.1 przedstawiono w tabeli 4.1 informacje na temat kosztu czasu oraz ilości sprzężeń w nowej zoptymalizowanej macierzy w zestawieniu z macierzą opracowaną z oryginalnego przebiegu procesu produkcyjnego w wybranej firmie.

*Tab. Błąd! W dokumencie nie ma tekstu o podanym stylu..3 Czas, koszty oraz sprzężenia zwrotne procesu produkcyjnego po optymalizacji. Źródło: opracowanie własne.*

	Macierz przed optymalizacją (j.u.)	Macierz po optymalizacji (j.u.)	Zaoszczędzono
całkowity Czas	1 433	<b>757</b>	<b>47 %</b>
całkowity Koszt	118 645	<b>61 389</b>	<b>48 %</b>
Czas sprzężeń progresywnych	542	<b>542</b>	<b>0%</b>
Koszt sprzężeń progresywnych	42 900	<b>42 900</b>	<b>0%</b>
Czas sprzężeń zwrotnych	891	<b>215</b>	<b>76%</b>
Koszt sprzężeń zwrotnych	75 745	<b>18 489</b>	<b>76%</b>
Liczba sprzężeń zwrotnych	40	<b>21</b>	<b>48%</b>

Po optymalizacji całkowity czas procesu produkcyjnego skrócił się z 1 433 j.u. do 757 j.u., natomiast koszt całkowity zmniejszył się z 118 645 j.u. do 61 389 j.u. Czas i koszt sprzężeń progresywnych pozostał taki sam ze względu na sekwencyjność realizacji. Liczba sprzężeń zwrotnych uległa zmniejszeniu, co przyczyniło się do skrócenia czasu realizacji zadań wywołanego sprzężeniami zwrotnymi z 891 j.u. do 215 j.u. oraz zmniejszenia kosztu z 75 745 j.u. kosztu do 19 489 j.u..

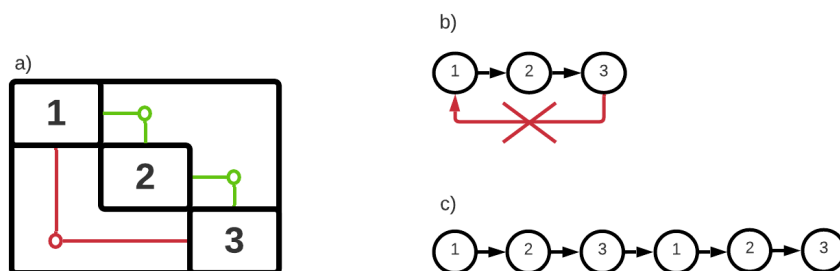
Wdrożenie zoptymalizowanego przebiegu procesu produkcyjnego w wybranej firmie jest wręcz niemożliwe. Wynika to z szeregu zdarzeń, które przedsiębiorstwo musi zagwarantować między innymi: ciągły dostęp do zasobów ludzkich, niezawodność funkcjonalna parku maszynowego, stały dostęp do materiałów, zmienność oprzyrządowania produkcyjnego, stały nadzór nad transportem wewnątrzzakładowym oraz płynność finansowa. Jednakże podczas spotkania z Zarządem Spółki i przedstawieniu wyników analizy przyjęto, że nawet jeżeli firma zaoszczędziłaby tylko 10% z obliczonych oszczędności, to i tak jest to wielki sukces. Przyjęto więc, że realne oszczędności mogą kształtować się na poziomie: całkowity czas realizacji 7%, natomiast całkowity koszt realizacji 6,4%.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W tym bardzo trudnym czasie spowodowanym pandemią Covid-19 szczególnie ważne dla przedsiębiorstw jest szukanie oszczędności, gdziekolwiek się da. Kluczową w tym kwestię odgrywa prawidłowe planowanie zadań na wszystkich płaszczyznach działalności. Złe zaplanowanie dowolnego procesu wiąże się z jego niewydolnością, co prowadzi do zwiększenia czasu, a co za tym idzie wzrostu kosztu jego realizacji.

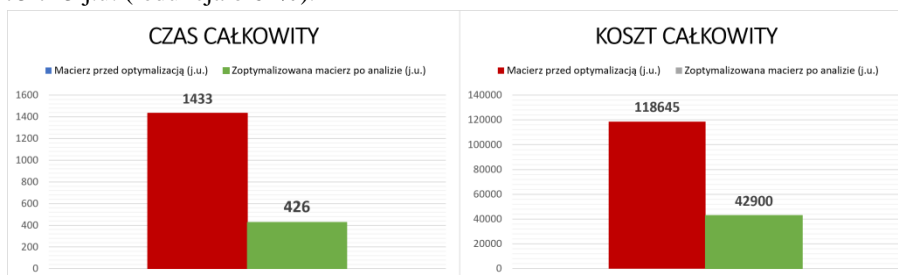
Tradycyjne metody takie jak harmonogramy Gantta i wykresy sieciowe nie uwzględniają wszystkich rzeczywistych relacji pomiędzy zadaniami poprzez brak uwzględnienia sprzężeń zwrotnych podczas ich konstruowania (rys 5.1 b). Może to powodować zakłamanie przedstawienie procesu produkcyjnego i czasu jego trwania. Zamieniając w tradycyjnych metodach sprzężenia zwrotne (rys 5.1 b) na sprzężenia progresywne (rys 5.1 c)

spowodowałyby to umieszczenie tych samych zadań, ponownie wydłużając całą strukturę realizacji przedsięwzięcia. W przypadku macierzy ten problem nie występuje i można w przejrzysty sposób uwzględnić całą strukturę obiegu informacji (rys 5.1 a).



Rys. 5.9 Różne ujęcia sprzężenia zwrotnego  
Źródło: opracowanie własne.

W przedstawionym rzeczywistym przykładzie procesu produkcyjnego skrzynki elektrycznej zastosowanie macierzy sprzężeń pozwoliło na znaczne skrócenie czasu realizacji i zmniejszenie kosztu całego przedsięwzięcia (rys. 5.2). Całkowity czas jego realizacji uległ skróceniu z 1 433 j.u. do 426 j.u., co przekłada się na oszczędność 1 007 j.u. (redukcja o 70%) natomiast całkowity koszt zmalał z 118 645 j.u. do 42 900 j.u., czyli aż o 75 745 j.u. (redukcja o 64%).



Rys. 5.10 Porównanie czasu i kosztu dla macierzy przed analizą i po analizie  
Źródło: opracowanie własne.

Z uwagi na fakt, że jest to wyidealizowany przypadek oraz przy optymalizacji nie uwzględniono wszystkich czynników, zaoszczędzenie nawet 10% z otrzymanych wyników wiąże się z dużymi oszczędnościami dla firmy.

W przyszłości planuje się rozszerzenie programu MAG PROJEKT poprzez wprowadzenie usprawnień w jego działaniu. Pozwoli to uszczegółwić wpisywane dane w celu zautomatyzowania prowadzenia analizy pod kątem równoległości i współbieżności realizacji zadań w zależności od zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwa.

## LITERATURA

- [1] **Browning T.R.**, Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities, IEEE Transactions on Engineering Management, 2015
- [2] **Chen L., Whyte J.**, *Understanding design change propagation in complex engineering systems using a digital twin and design structure matrix*, Engineering, Construction and Architectural Management, 2022
- [3] **Campbell A C., Collins M.**, *The One-Page Project Manager for Execution: Drive Strategy and Solve Problems with a Single Sheet of Paper*, WILEY, Hoboken 2013
- [4] **Eppinger S.D., Browning T.R.**, *Design structure matrix methods and applications*, MIT press, Cambridge 2012
- [5] **Sadeghi B., Cavaliere P. , Pruncu C.I.**, *Architectural design of advanced aluminum matrix composites: a review of recent developments*, Taylor & Francis, 2022
- [6] **Jędrych E., Pietras P, Szczepańczyk M**, ZARZĄDZANIE PROJEKTAMI, Politechnika Łódzka, Łódź 2012
- [7] **Lewis J.P.**, *Project planning, scheduling & control*, McGraw-Hill, New York 2011
- [8] **Lock D.**, *The Essentials of Project Management*, Routledge, 2014
- [9] **Rogers J.**, *Reducing Design Cycle Time and Cost Through Process Resequencing*, International Conf. on Engineering Design, 1997
- [10] **Steward D.V.**, *The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems*, IEEE Transactions on Engineering Management 1981
- [11] Wewnętrzna dokumentacja firmy EURO-BOX sp. z o.o.
- [12] <https://dsmweb.org/sequencing-a-dsm/> (data dostępu: 10.04.2021)
- [13] <https://www.eurobox.pl/produkty.html> (data dostępu: 10.04.2021)

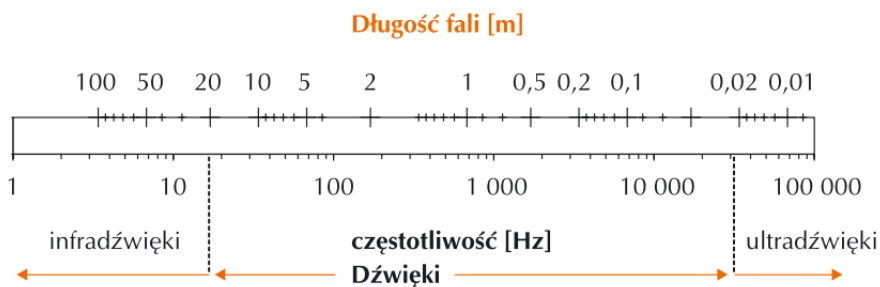




# ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE ROZPRASZACZA FAL AKUSTYCZNYCH ORAZ ICH WPŁYW NA SKUTECZNOŚĆ MINIMALIZOWANIA POZIOMU DŹWIĘKU NA STANOWISKU PRACY

## 1. WPŁYW HAŁASU NA WARUNKI ŚRODOWISKA PRACY

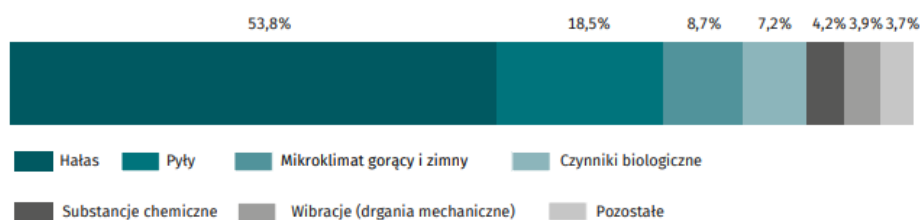
Hałasem określane są wszelkie niepożądane, dokuczliwe lub szkodliwe dla człowieka drgania mechaniczne ośrodka sprężystego, działające na organizm ludzki za pośrednictwem powietrza. W zależności od częstotliwości fal wyróżnia się infradźwięki o częstotliwości niższej od 20 Hz. Nie są one słyszalne przez człowieka, lecz mogą być odczuwalny poprzez działanie mechanoreceptorów rozmieszczonych na ciele ludzi. Ponadto wyróżnia się hałas słyszalny o częstotliwości w przedziale od 20 do 20 000 Hz, oraz ultradźwięki o częstotliwości ponad 20 000 Hz, również niesłyszalne dla człowieka. Z fizycznego punktu widzenia dźwięk to fala rozchodząca się w ośrodku sprężystym, wywołująca wrażenie słuchowe.



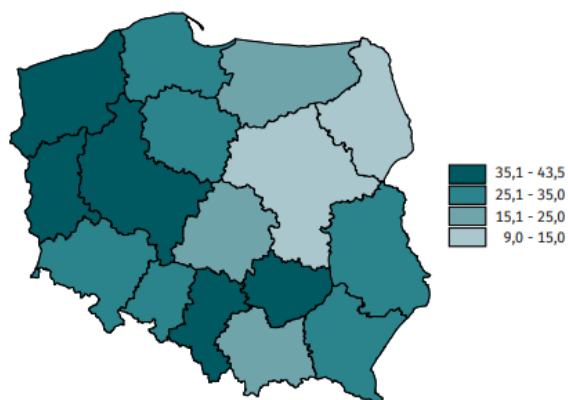
Rys 1. Klasyfikacja fal akustycznych (dźwiękowych) ze względu na częstotliwość [9]

Przewlekłe zawodowe narażenie na hałas powoduje zniszczenie wrażliwych struktur ucha wewnętrznego, w tym w szczególności komórek zmysłowych (komórek słuchowych zewnętrznych). W patogenezie tych uszkodzeń istotną rolę odgrywają procesy metaboliczne (stres oksydacyjny), a dla wysokich ekspozycji na hałas – zniszczenia mechaniczne. Po wielu latach narażenia dochodzi do wtórnej degeneracji włókien nerwu ślimakowego (słuchowego) i innych struktur ucha wewnętrznego [11]. Uszkodzenie słuchu związane z narażeniem na hałas w miejscu pracy jest nieodwracalne i nieuleczalne.

ne. Zawodowe uszkodzenie słuchu od wielu lat znajduje się w czołówce chorób o podłożu zawodowym. Pracodawca jest zobowiązany przedsięwziąć działania zmierzające do zapewnienia ochrony pracowników przed zagrożeniami związanymi z narażeniem na hałas. Zmierzają one przede wszystkim do stosowania procesów technologicznych niepowodujących długotrwałej ekspozycji na nadmierny hałas, czy też zastosowanie maszyn oraz urządzeń generujących możliwie najmniejszy poziom hałasu. Wszelkie działania w tym zakresie zmierzają do nieprzekraczania dopuszczalnych poziomów hałasu na stanowisku pracy i odnoszą się do najwyższych dopuszczalnych natężeń czynników fizycznych określonych w aktach prawnych dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy. Zauważyć w tym miejscu należy, że problem narażenia pracowników na hałas nie odnosi się wyłącznie do stanowisk na których wykorzystywane są maszyny i urządzenia w procesach produkcyjnych. Istotnym tematem rozważań związanych z koniecznością kształtowania odpowiednich warunków akustycznych na stanowisku pracy są również pomieszczenia biurowe. Brak w tego typu miejscach źródeł hałasu emitujących wysoki poziom dźwięku nie zwalnia pracodawców od podejmowania wszelkich działań zmierzających do optymalizowania warunków akustycznych. Hałas jest czynnikiem, który poprzez swoje oddziaływanie na pracowników, może negatywnie wpływać na samopoczucie psychiczne, jak i na układ nerwowy, stanowiąc realne zagrożenie dla zdrowia ludzi. Stanowi on w większości przypadków źródło pogorszenia wydajności oraz jakości pracy. Hałas jest najczęściej identyfikowanym czynnikiem w środowisku pracy w Polsce. Dane Głównego Urzędu Statystycznego, dotyczące warunków pracy w Polsce w 2021 r., wskazują, że 53,8% pracowników wykonywało swoje obowiązki w ekspozycji na hałas [4]. Badania w zakresie zagrożeń wibroakustycznych stanowią istotny wkład w proces poprawy warunków pracy. Warto podkreślić, że hałas obniża zrozumiałość mowy, co może znacząco wpływać na bezpieczeństwo pracy, oraz zaburza percepcję sygnałów ostrzegawczych, co przekłada się na zwiększenie ryzyka wypadków przy pracy. Należy podkreślić, że województwo lubuskie jest regionem, w którym narażenie na hałas stanowi istotny problem. Dane GUS wskazują, że jesteśmy jednym z pięciu województw z najliczniejszym odsetkiem pracowników zatrudnionych w warunkach narażenia na hałas.

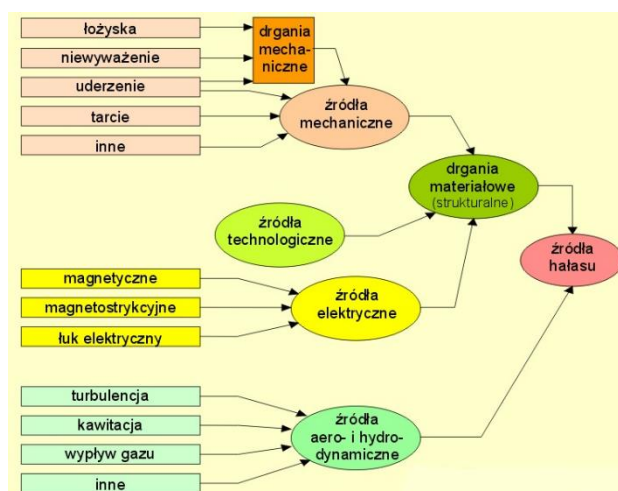


Rys.2. Zatrudnieni w warunkach zagrożenia związanego ze środowiskiem pracy w 2021 roku [4]



Rys. 3. Zatrudnieni w warunkach zagrożenia hałasem na 1000 zatrudnionych w zakładach objętych badaniem w 2021 roku [4]

Zaznaczyć należy, że źródła hałasu na stanowiskach pracy są bardzo liczne i minimalizowanie narażenia na ten czynnik stanowi poważne wyzwanie dla pracodawców oraz pracowników służby bhp.

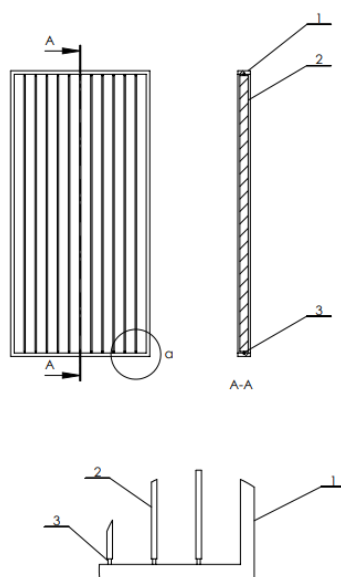


Rys. 4. Źródła hałasu w maszynach i urządzeniach [2]

## 2. BADANIA SKUTECZNOŚCI ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH ROZPRASZACZA DŹWIĘKU

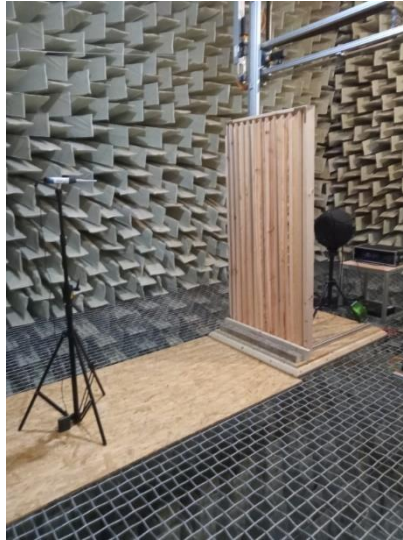
Podjęcie tematyki związanej z ograniczeniem hałasu na stanowiskach pracy poprzez zastosowanie rozpraszacza dźwięku, bazuje na badaniach realizowanych w Laborato-

rium Akustyki Parku Naukowo – Technologicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zaprojektowany rozpraszacz dźwięku skutecznie ograniczył poziom dźwięku, dzięki zastosowaniu konstrukcji składającej się z łopatek osadzonych w ramie drewnianej, umożliwiającej dowolne ułożenie elementów i zmianę kąta położenia względem źródła hałasu. Zastosowanie rozpraszacza dźwięku ma na celu zmniejszenie poziomu hałasu na stanowisku sąsiadującym ze źródłem hałasu. Ma zatem za zadanie, zmniejszenie poziomu dźwięku przedostającego się pomiędzy stanowiskami pracy.



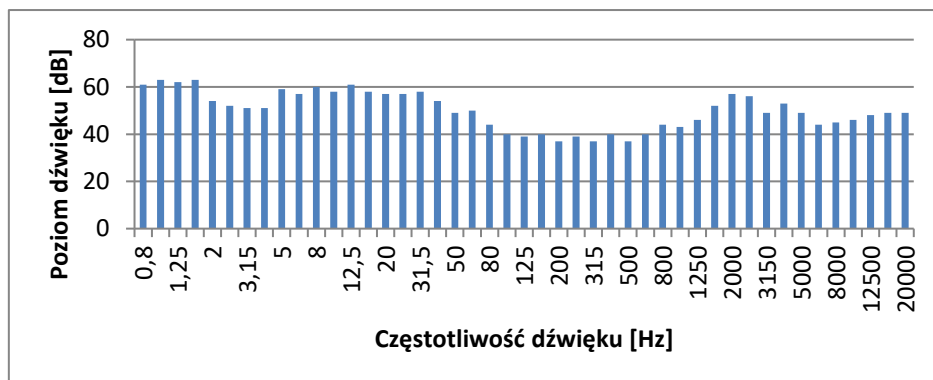
Rys. 5. Modułowy rozpraszacz dźwięku [5]

Badania prowadzone zostały w kierunku wyboru najefektywniejszego rozwiązania bazującego na konstrukcji łopatek rozpraszacza dźwięku. Pomiar poziomu dźwięku przenikającego przez rozpraszacz pozwoliły na określenie ich optymalnych wymiarów. Pomiar zmierzał do uzyskania odpowiedzi na pytanie, czy zwiększenie szerokości łopatek i co za tym idzie płaszczyzny natarcia fali dźwiękowej zwiększy skuteczność działania rozpraszacza dźwięku. Badania wykonywano przy użyciu miernika poziomu dźwięku SVAN 979 oraz wszechkierunkowego źródła dźwięku, składającego się z zestawu 12 głośników w dwunastościennej obudowie, umożliwiającego równomierną emisję dźwięku przy jego przestrzennym rozkładzie. Badania przeprowadzono w komorze bezchodowej, dzięki czemu wyeliminowano dźwięki, które mogą odbijać się od powierzchni takich jak, sufit i ściany. Badania polegały na pomiarze poziomu dźwięku w odległości 3 metrów od źródła hałasu, co odpowiada w większości przypadków, odległości w jakiej znajduje się maszyna lub urządzenie na sąsiednim stanowisku pracy.



Zdj. 1 Badanie poziomu dźwięku w komorze bezchowej [5]

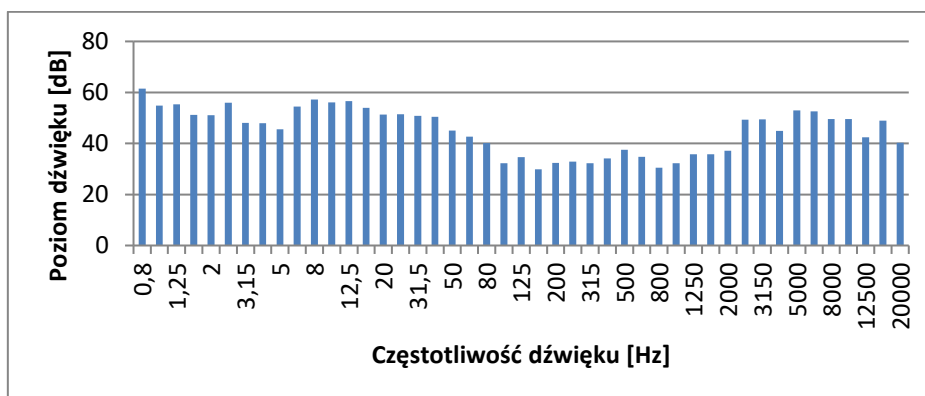
Badania rozpoczęto od pomiaru poziomu dźwięku bez przegrody w postaci rozpraszacza dźwięku. Wyniki przedstawiono w postaci widma dźwięku. Źródło hałasu charakteryzowało się wyższymi poziomami dźwięku w zakresie niskich częstotliwości oraz wyższych częstotliwości słyszalnych. Szczegółowe wartości przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 6. Analiza częstotliwościowa źródła dźwięku (opracowanie własne)

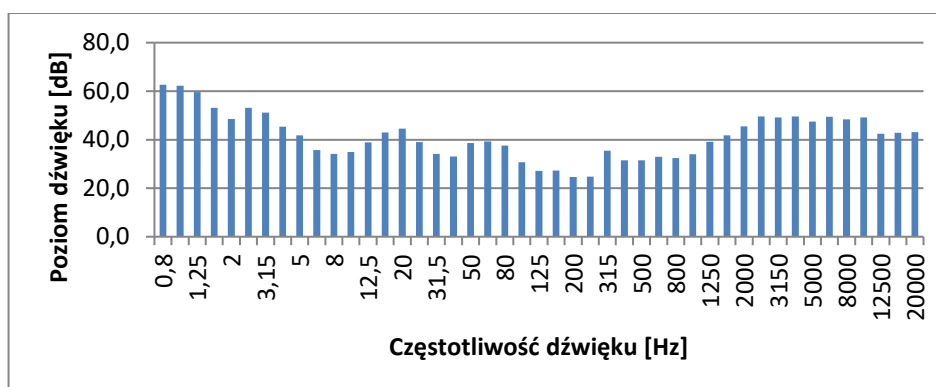
Analizując wpływ wymiarów łopatek wykorzystanych w rozpraszaczu dźwięku zastosowano trzy szerokości tych elementów – 5 mm, 10 mm i 20 mm. Zastosowanie łopatek o szerokości 5 mm pozwoliło na zmniejszenie poziomu dźwięku szczególnie w przedzia-

le od 50 Hz do 2000 Hz. Poziom dźwięku nie przekroczył dla wskazanych częstotliwości wartości 40 dB.



Rys. 7. Analiza częstotliwościowa dźwięku przy zastosowaniu łopatek o szerokości 5 mm (opracowanie własne)

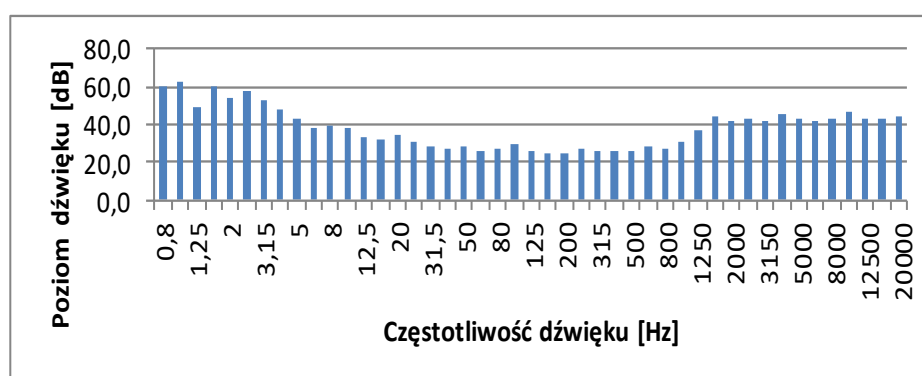
Zastosowanie łopatek o szerokości 10 mm pozwoliło na zmniejszenie poziomu dźwięku zarówno w przedziale od 50 Hz do 2000 Hz, gdzie uzyskano wartości oscylujące w okolicach 40 dB, jak również wyraźne obniżenie hałasu w zakresie infradźwięków, w szczególności w zakresie od 5 Hz do 20 Hz.



Rys. 8. Analiza częstotliwościowa dźwięku przy zastosowaniu łopatek o szerokości 10 mm (opracowanie własne)

Zakładając jak najszerszy zakres zastosowanych zmiennych, podjęto pomiary przy zastosowaniu łopatek o szerokości 20 mm. Duża płaszczyzna natarcia fali dźwiękowej, zgodnie z przyjętymi założeniami, skutkowałą osiągnięciem najlepszych wyników w zakresie minimalizowania poziomu hałasu przenikającego przez rozpraszacz dźwięku.

Uzyskano podczas pomiarów najniższe poziomy dźwięku we wszystkich zakresach częstotliwości, zarówno w zakresie infradźwiękowym, jak i w zakresie słyszalnym. Warto odnotować, że w zakresie infradźwiękowym rozpraszacz dźwięku nie jest tak skuteczny, jak w zakresie częstotliwości słyszalnych. Niebagatelne znaczenie ma w tym przypadku długość fal w zakresie do 20 Hz. Znacząco dłuższa fala jest trudno do rozproszenia i tego typu rozwiązania nie będą skuteczne. Duża skuteczność cechuje rozpraszacz dźwięku w zakresie słyszalnym od 20 Hz do 20000 Hz.



Rys. 9. Analiza częstotliwościowa dźwięku przy zastosowaniu łopatek o szerokości 20 mm (opracowanie własne)

## PODSUMOWANIE

Hałas występujący na stanowiskach pracy może być źródłem rozwoju różnego rodzaju chorób, co w konsekwencji doprowadzić może do występowania trudności z koncentracją i zmniejszeniem wydajności pracy oraz obniżeniem zadowolenia z pracy. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) wiąże uciążliwość hałasu z niekorzystnym wpływem na zdrowie i definiuje ją jako doświadczenie wielu różnych reakcji, takich jak gniew, rozczarowanie, niezadowolenie, wycofanie, bezradność, depresja, lęki, rozproszenie uwagi, wyczerpanie [12]. W związku z tym bardzo istotne jest podejmowanie wszelkich działań zmierzających do zmniejszenia ekspozycji na ten czynnik, identyfikowany w środowisku pracy. Przedstawione wyniki badań nad elementem rozpraszającym hałas, wskazują na skuteczność rozwiązań z wykorzystaniem możliwie szerokich elementów, zapewniających dużą płaszczyznę natarcia fali dźwiękowej. Przedstawione wyniki potwierdzają możliwość obniżenia poziomu dźwięku o kilka decybeli, co w przypadku hałasu oznacza efektywność na zadowalającym poziomie. Zastosowanie rozpraszacza dźwięku pozwoli na skuteczne działania zmierzające do poprawy warunków pracy na stanowiskach wyposażonych w urządzenia i maszyny emitujące wysokie poziomy dźwięku.



## LITERATURA

- [1] **Donald I., Oi Ling S.:** *Moderating the stress impact of environmental conditions: The effect of organizational commitment in Hong Kong and China*, Journal of Environmental Psychology, China, 2001
- [2] **Engel Z.:** *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [3] **Engel Z., Engel J., Kosala K.:** *Vibroacoustic processes, sources, research, analysis*, WIMiR AGH, Cracow, Poland, 2009
- [4] Główny Urząd Statystyczny, *Warunki pracy w 2021 roku*, Urząd Statystyczny w Gdańsku, Ośrodek Statystyki Warunków Pracy, Pomorski Ośrodek Badań Regionalnych, www.gus.gov.pl, Warszawa, Gdańsk, 2022.
- [5] **Kaźmierczak P., Kielec R.:** *Solution to Increase Work Efficiency and Quality, by Using a Modular Sound Diffuser, That Determines The Acoustical Climate Conditions at The Workstation*, Proceedings of the 39th International Business Information Management Association Conference, Granada Spain, 2022
- [6] **Mikulski W.:** *Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – zastosowanie środków technicznych w typowym pomieszczeniu*, Medycyna Pracy, 2018, 69 (2), 153-165.
- [7] **Münzel T., Hahad O.:** *Annoyance to different noise sources is associated with atrial fibrillation in the Gutenberg Health Study*, International Journal of Cardiology 264, 2018
- [8] **Ozimek E.:** *Sound and its perception*, PWN, Warsaw, Poland, 2018
- [9] **Pawlaczyk – Łuszczynska M.:** *Minimalizowanie ryzyka uszkodzenia słuchu w miejscu pracy*, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź, 2010
- [10] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 roku w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy ( Dz. U. 2018 poz. 1286).
- [11] **Śliwińska-Kowalska M.:** *Audiologia kliniczna*. Mediton, Łódź 2005, s. 89–96
- [12] World Health Organization, *Burden of disease from environmental noise. Quantification of health life years lost in Europe*, 2011

# **OPTIMALIZACJA PROCESU LutowANIA W ZAKRESIE REDUKCJI FRAKCJI NIEZGODNOŚCI ORAZ STRAT MATERIAŁOWYCH**

## **1. WPROWADZENIE**

W dzisiejszych czasach automatyzacja procesów jest coraz bardziej popularna i powszechna. Jej głównym celem jest zwiększenie wydajności produkcyjnej oraz osiągnięcie większej efektywności podczas produkcji. Wraz z automatyzacją procesów pojawiają się również błędy i niezgodności, które często są przyczyną dodatkowych kosztów przetwarzania surowców i materiałów. Aby uniknąć takich problemów, w procesie produkcji wprowadza się działania kontrolne i analizy procesów. Najbardziej efektywną metodą kontroli jakości wytwarzanego produktu jest bezpośredni nadzór (kontrola) podczas jego produkcji [1]. Sama kontrola generuje koszty, ale nie daje wartości dodanej do wyrobu, ponieważ jedynie ocenia produkt pod kątem wykonania go z założeniami jakościowymi. Należy mieć jednak świadomość, że zaniedbanie tej kontroli w następstwie może generować znacznie większe koszty spowodowane reklamacjami czy pogorszeniem biznesowych relacji z klientem. Często przeprowadzana kontrola daje możliwość szybkiego zidentyfikowania błędu i jeśli to możliwe naprawy niezgodności, czy też szybsze odrzucenie wadliwego produktu i uniknięcie marnowania kolejnych zasobów poprzez pozostawienie wadliwego produktu w kolejnych etapach produkcji.

W przypadku produkcji w branży medycznej precyzja i powtarzalność są niezwykle istotne, dlatego też zastosowanie robotów staje się coraz bardziej powszechne. Jednakże, ze względu na szczególne wymagania i normy w branży medycznej, pojawiają się również wady i niezgodności, które należy skutecznie eliminować. Jednym z kluczowych aspektów, które wymagają szczególnej uwagi, jest proces lutowania miękkiego w automacie Combitrans [2]. Lutowanie jako kluczowy element produkcji medycznej, wpływa na jakość i niezawodność produktów. W tym kontekście, w niniejszym artykule podjęto próby rozwiązania pewnych problemów, które pojawiły się w przedsiębiorstwie w związku z zastosowaniem robotów w produkcji medycznej. Produkcja Combitrans jest stale optymalizowana, aby zredukować liczbę wad do minimum. By zredukować występowanie wad w urządzeniu operatorzy dokumentują liczbę wszystkich występujących niezgodności. W obliczu tych wyzwań podjęto działania, mające na celu weryfikację i optymalizację procesu lutowania poprzez wykorzystanie narzędzi zarządzania jakością: diagramu Ishikawy [3] oraz mapy procesu produkcyjnego [4]. Celem tego typu działań było zredukowanie liczby wad i niezgodności elektrycznych oraz poprawienie ogólnej jakości procesu

produkcyjnego. Wdrożenie nowych rozwiązań może spowodować zwiększenie efektywności, co przełoży się na większą konkurencyjność. W tym artykule przedstawiono analizę obecnego stanu procesu lutowania, zidentyfikowano główne problemy oraz zaproponowana została modyfikacja uchwytu stacji, która dość znacznie przyczyniła się do poprawy jakości i niezawodności weryfikowanego procesu.

## 2. TECHNOLOGIA LUTOWANIA

W niniejszym projekcie dość szczegółowo poruszono tematykę związaną z procesem lutowania, który bardzo często stosowany jest w procesach produkcyjnych oraz zagadnienia związane z wykorzystaniem różnych narzędzi zarządzania jakością jakie niezbędne są podczas ich sterowania. Dlatego, w projekcie tym zaprezentowano różne metody lutowania, jak na przykład lutowanie miękkie oraz twarde, a także przy okazji omówiono różne czynniki, które mają istotny wpływ na jakość jego wykonania. Następnie, główna uwaga została skoncentrowana na zastosowaniu różnych narzędzi zarządzania jakością w wybranym procesie produkcyjnym. W związku z tym, dość szczegółowo przedstawiono tutaj znaczenie oraz cel stosowania tego typu narzędzi w procesach produkcyjnych, a także przy okazji omówiono najważniejsze z nich. Ponadto, szczegółowemu opisowi poddano diagram Ishikawy oraz mapę analizowanego procesu produkcyjnego, które stanowią kluczowe narzędzia w procesie analizy jakości wytwarzanych produktów oraz identyfikacji potencjalnych obszarów będących źródłem problemów w takim procesie produkcyjnym.

### 2.1. Lutowanie

Lutowanie bądź proces lutowania jest bardzo prostą operacją polegającą na łączeniu ze sobą różnych elementów często wykonanych z różnych materiałów (metali, stopów metali, tworzyw i kompozytów) za pomocą dodatkowo roztopionego materiału, który jest metalem określanym jako spoiwo bądź lutem. W przypadku odpowiedniego dobrania spoiwa o temperaturze topnienia niższej niż temperatura topnienia łączonych elementów można wykonać prawidłowe połączenie lutowane [5]. Jeżeli chodzi o wymagania jakie stawiane są wykonywanym lutom to poniżej przedstawionych zostało kilka z nich, gdzie:

- lut powinien powstać poprzez właściwe podgrzewanie łączonych metali, aby zapobiec powstawaniu tzw. „zimnych lutów”, które cechują się bardzo słabymi właściwościami wytrzymałościowymi,
- należy tak dobrać spoiwo, aby po podgrzaniu wykazywało dobrą lejność, ale żeby było również odporne na utlenianie,
- powierzchnie lutowane powinny być czyste, ponieważ ma to bardzo istotny wpływ na późniejszą szczelność lutu.

Natomiast, jeżeli chodzi o procesy produkcyjne, w których stosuje się połączenia lutowane, to stawia się im konkretne wymagania techniczne i jakościowe wynikające z następujących norm:

- PN-EN ISO 9453:2021-04 - "Luty miękkie - Składy chemiczne i postacie" - norma regulująca wymagania dotyczące składu chemicznego lutów miękkich [6],

- PN-EN 12797:2002 - "Łączenie rur i kształtek z metalu za pomocą lutowania miękkiego" - norma zawiera wymagania techniczne i jakościowe dotyczące połączeń rur i kształtek za pomocą lutowania miękkiego [7].
- PN-EN 13067:2021 – „Egzamin kwalifikacyjny spawaczy i zgrzewaczy. Spawane i zgrzewane połączenia z tworzyw termoplastycznych” – norma precyzuje metodę sprawdzania wiedzy i umiejętności spawaczy i zgrzewaczy, od których wymaga się wykonywania spawania i zgrzewania w nowych konstrukcjach z tworzyw termoplastycznych i w pracach remontowych [8].
- PN-EN 13134:2004 – „Lutowanie twarde - Uznawanie technologii” - norma reguluje zasady (metody badania, złącza próbne) dotyczące wymagań i uznawania metod lutowania na twardo wszystkich materiałów, metali i niemetali [9].

Poza przedstawionymi normami, bardzo często mówiąc o operacji lutowania ma się na myśli również wymagania stawiane połączeniom wykonywanym w procesie lutowania. W tym przypadku bardzo często proces ten swoim zakresem obejmuje również takie czynniki jak: wytrzymałość połączenia, ich odporność na korozję, szczelność, dokładność wymiarów czy estetykę wykonywanego połączenia. W związku z tym, rygorystyczne przestrzeganie wszystkich norm i standardów branżowych pozwala na uzyskanie połączeń lutowanych, które charakteryzują się dużą trwałością, solidnością wykonania, a tym bardziej spełniają określone wymagania techniczne.

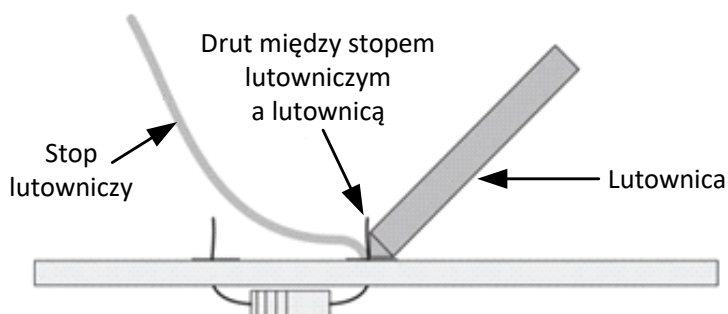
## 2.2. Podział lutowania ze względu na temperaturę topnienia

Sam proces lutowania można sklasyfikować ze względu na stosowaną (wykorzystywaną) w tym procesie temperaturę topnienia spoiwa łączącego lutowane elementy. Wśród lutowania jednym z najpowszechniejszych podziałów jest podział na lutowanie miękkie, podczas którego wykorzystuje się spoiwa o temperaturach topnienia poniżej 450°C oraz na lutowanie twarde w przypadku, gdy temperatura topnienia spoiwa przekracza 450°C. Natomiast o tym, którą metodę lutowania (na twardo czy na miętko) należy wybrać w danym procesie produkcyjnym głównie decyduje to, czy podczas łączenia ze sobą części w tym procesie po zastosowaniu konkretnej temperatury topnienia spoiwa, przy okazji nie uszkodzimy (zniszczymy) tych łączonych elementów.

### 2.2.1. Lutowanie miękkie

Jak już wspomniano, lutowanie miękkie to proces łączenia metali za pomocą lutu o niskiej temperaturze topnienia. Lutowanie miękkie wykorzystywane jest w wielu dziedzinach przemysłu, między innymi elektroniki, motoryzacji, budownictwa, a także w rzemiośle artystycznym. Proces ten polega na stopieniu lutu i wypełnieniu nim szczeliny pomiędzy elementami, które chcemy ze sobą połączyć. Następnie tak otrzymany lut musi się schłodzić do temperatury otoczenia, by otrzymać trwałe i wytrzymałe połączenie. Właściwości fizyczne lutów wykonywanych podczas lutowania miękkiego w dużej mierze zależą od składu chemicznego użytego spoiwa oraz od ilości dodanych do niego pierwiastków jak ołów, cynk, miedź czy srebro. Tak jak już wcześniej wspomniano, luty otrzymywane z lutowania miękkiego charakteryzują się niską temperaturą topnienia, a to głównie wynika

z zastosowania małej zawartości pierwiastków stopowych oraz z stosunkowo małej wartości ciepła topnienia. Lutowanie jest procesem chemicznym, w którym grot lutowniczy nagrzewa łączone elementy do zadanej temperatury, tak powstały lut reaguje z powierzchnią łączonych elementów, tworząc w ten sposób trwałe połączenie. Czyli, po nałożeniu takiego lutu na łączone elementy, ich powierzchnie styku reagują z nim (lutem), a to prowadzi do powstania połączenia intermetallicznego, czyli tzw. stopu lutowniczego, który ma pośrednie właściwości fizyczne łączonych metali. Tak powstałe połączenie charakteryzuje się dużą trwałością oraz odpornością na korozję. Podczas procesu lutowania miękkiego stop lutowniczy stopniowo przekształca się z fazy ciekłej w fazę stałą, a następnie podczas kolejnego, ochładzania się i przechodzi do postaci krystalicznej.



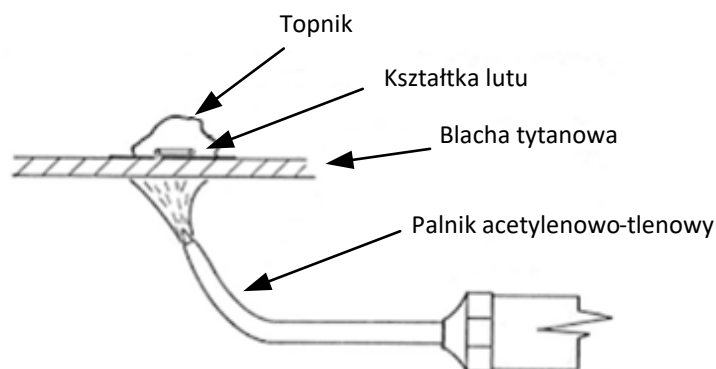
Rys. 1. Schemat lutowania miękkiego [10]

Na powyższym rysunku (Rys. 1) przedstawiono proces lutowania miękkiego. Proces ten rozpoczyna się od rozgrzania stopu lutowniczego (spoiwa), a następnie od umieszczenia lutowanych elementów w miejscach docelowych. Podczas operacji lutowania rozgrzany stop lutowniczy (spoiwo) wypełnia wolną przestrzeń pomiędzy łączonym drutem, a docelowym elementem montażu w wyniku czego po schłodzeniu powstaje trwałe połączenie lutowane.

### 2.2.2. Lutowanie twarde

Drugim rodzajem lutowania jest lutowanie twarde, które jest metodą łączenia metali za pomocą lutu o wysokiej temperaturze topnienia - powyżej  $450^{\circ}\text{C}$ . Tego typu lutowanie wykorzystywane jest w wielu różnych dziedzinach przemysłu jak na przykład w przemyśle zbrojeniowym, w produkcji maszyn, a także w rzemiośle artystycznym. W tym przypadku, proces ten polega również na stopieniu lutu i wypełnieniu nim szczeliny pomiędzy elementami, które chcemy połączyć. Po wykonaniu lutu jest on stopniowo chłodzony do temperatury otoczenia tworząc w ten sposób trwałe połączenie. Właściwości fizyczne lutów stosowanych do lutowania twardego, tak jak podczas lutowania miękkiego, również zależą od składu i ilości dodanych pierwiastków, ale innego rodzaju. Do tych pierwiastków zaliczamy miedź, cynę, srebro, nikiel, molibden oraz złoto. Luty do lutowania twardego charakteryzują się wysoką temperaturą topnienia, co wynika z większej zawartości pierwiastków stopowych oraz z stosunkowo wysokiej wartości ciepła topnienia. Lutowanie twarde jest procesem chemicznym, w którym lut reaguje z powierzchnią łączonych

elementów, tworząc trwałe połączenie. Po nałożeniu lutu na łączone elementy, powierzchnie styków reagują z nim, a to prowadzi do powstania połączenia intermetalicznego, czyli stopu lutowniczego, który podobnie jak w przypadku lutowania miękkiego ma także pośrednie właściwości fizyczne łączonych metali. Tak powstałe połączenie charakteryzuje się równie dużą trwałością oraz odpornością na korozję. Podczas lutowania twardego, technika lutowania wymaga rozgrzania łączonych elementów do zadanej temperatury, a to powoduje w następstwie łatwe nałożenie lutu. W efekcie jego schłodzenia (lutu), łączone elementy stygną, ich powierzchnie styku kurczą się, a to zapewnia utworzenie trwałego i wytrzymałego połączenia. Podczas procesu lutowania twardego, stop lutowniczy również przekształca się z fazy ciekłej w fazę stałą, a następnie dalej ochładzając się przechodzi do postaci krystalicznej. Podczas lutowania twardego bardzo ważne jest precyzyjne kontrolowanie temperatury topnienia spoiwa, po to, aby uniknąć nadmiernego rozszerzania lub kurczenia się powierzchni łączonych elementów, które może doprowadzić do zniekształceń lub uszkodzeń (pęknięć) takiego połączenia. W przypadku lutowania twardego, stosuje się również inne dodatkowe narzędzia pomocnicze jak żelazo lutownicze, ścierniwa i szczotki, kleszcze, piły oraz kształtki lutu.



Rys. 2. Schemat lutowania twardego [opracowanie własne]

W operacji lutowania twardego ze względu na dużo większą ilość energii, ciepła ( $>450^{\circ}\text{C}$ ) jaką trzeba dostarczyć do przeprowadzenia tego procesu, wymagane jest stosowanie bardziej wyspecjalizowanych narzędzi, między innymi różnego rodzaju palników, lutownic oporowych, itp.. Na powyższym rysunku (Rys. 2) przedstawiono proces lutowania twardego blachy tytanowej oraz narzędzia typu kształtka lutu, która pozwala na precyzyjne zaaplikowanie stopionego spoiwa lutowniczego na łączonych elementach.

### 2.3. Cechy wspólne oraz różnice lutowania miękkiego i twardego

Nie ulega wątpliwości, że lutowanie miękkie, jak i lutowanie twarde są powszechnie stosowane w różnych procesach produkcyjnych. Pomimo tego, że obie metody mają na celu łączyć ze sobą elementy, to znajdują się pomiędzy nimi dość istotne różnice oraz podobieństwa. Różnice jakie można zauważyć pomiędzy lutowaniem miękkim, a twardym

można rozgraniczyć na 5 odrębnych kategoriach jak temperatura topnienia, materiały lutownicze, zastosowanie, wytrzymałość połączeń, zastosowany sprzęt oraz technika, gdzie:

- temperatura topnienia – podczas lutowania miękkiego stosuje się materiały lutownicze jak stopy cyny i ołowiu lub cyny i srebra o temperaturze topnienia w przedziale od 90°C do 450°C, lutowanie twarde wymaga temperatur z przedziału od 450°C do 900°C i wykorzystuje materiały lutownicze na bazie srebra, miedzi oraz mosiądzu,
- materiały lutownicze - w lutowaniu miękkim wykorzystywane są materiały lutownicze zawierające cynę, które z tego powodu mają niższą wytrzymałość mechaniczną. W przypadku lutowania twardego stosowane są materiały lutownicze bazujące na srebrze, miedzi oraz mosiądzu, a to sprawia, że mają one o wiele wyższą wytrzymałość mechaniczną,
- zastosowania - lutowanie miękkie często jest stosowane w elektronice, montażu drutów, przewodów i innych delikatnych komponentów, gdzie niskie temperatury topnienia są wskazane (korzystne). Lutowanie twarde jest używane podczas łączenia materiałów, które muszą wytrzymać wysokie temperatury w miejscu ich docelowego zastosowania, wysokie obciążenia mechaniczne oraz agresywne środowisko chemiczne, np. rurociągi, elementy konstrukcyjne, elementy silników, itp.,
- wytrzymałość połączeń - lutowanie twarde tworzy połączenia o wyższej wytrzymałości mechanicznej oraz odporności na korozję w porównaniu z lutowaniem miękkim, a to sprawia, że lutowanie twarde jest o wiele lepsze do zastosowań wymagających większej wytrzymałości i trwałości takiego połączenia,
- sprzęt i technika - lutowanie miękkie zwykle wymaga zastosowania lutownicy elektrycznej lub gazowej, podczas gdy lutowanie twarde wymaga palnika gazowego, który byłby w stanie wytworzyć dużo wyższe temperatury niezbędne do topienia materiałów lutowniczych. Technika aplikacji lutu również się różni w obu przypadkach: lutowanie miękkie polega na rozprowadzaniu lutu na powierzchniach, które mają być połączone, podczas gdy lutowanie twarde wymaga rozgrzania całego obszaru połączenia w celu osiągnięcia równomiernego rozprowadzenia materiału lutowniczego.

Natomiast, jeżeli chodzi o cechy wspólne lutowania miękkiego oraz twardego to można wśród nich wyróżnić 6 cech wspólnych, jak:

- wykorzystanie lutu - w obu przypadkach lut stosuje się do połączenia łączonych elementów. Jedyną różnicą polega na tym, że lutowanie miękkie wymaga lutów o niższej temperaturze topnienia (poniżej 450°C), a lutowanie twarde wymaga użycia lutów o wyższej temperaturze topnienia (powyżej 450°C),
- technika lutowania - w obu przypadkach wymagane jest podgrzanie łączonych elementów do odpowiedniej temperatury w celu umożliwienia rozpuszczenia się spoiwa (lutu). Po schłodzeniu lutu do temperatury otoczenia twardnieje on, a tym samym tworzy trwałe i wytrzymałe połączenie,
- możliwość lutowania różnych metali - lutowanie miękkie oraz twarde umożliwiają łączenie ze sobą różnych metali, a to jest korzystne w wielu zastosowaniach przemysłowych i nie tylko,

- trwałość połączenia - oba rodzaje lutowania tworzą trwałe połączenia o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i termicznej, a to czyni je idealnymi do stosowania w sytuacjach, gdzie wymagana jest duża wytrzymałość połączeń,
- wymaga umiejętności - zarówno lutowanie miękkie, jak i twarde wymaga umiejętności oraz doświadczenia, aby zapewnić prawidłowe połączenie łączonych elementów, a tym samym uniknąć wad jak pęknięcia, nadmierna ilość lutu czy niepełne połączenie,
- zastosowanie - lutowanie miękkie i twarde mają bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, elektronicznym, w przemyśle zbrojeniowym, przemyśle metalowym, a także w rzemiośle artystycznym jak złotnictwo czy srebrnictwo.

#### 2.4. Przebieg procesu lutowania miękkiego

Proces lutowania miękkiego to metoda łączenia metali poprzez stopienie lutu o niskiej temperaturze topnienia (poniżej 450°C) i wypełnienie nim szczeliny pomiędzy elementami, które chcemy ze sobą połączyć. Proces ten został rozdzielony na poszczególne elementy, które zostały zaprezentowane poniżej:

- Przygotowanie łączonych elementów  
Proces lutowania rozpoczyna się od przygotowania łączonych elementów. Elementy te należy odpowiednio przygotować, poprzez oczyszczenie ich z różnego rodzaju zanieczyszczeń, jak rdza, farba czy tłuszcz, by tworzony lut mógł prawidłowo przylegać do łączonych powierzchni. Następnie powierzchnię elementów łączonych należy dokładnie oszlifować, by dość znacznie zwiększyć powierzchnię ich styku i zapewnić lepsze połączenie.
- Przygotowanie lutu  
Spoiwo do lutowania miękkiego to zazwyczaj stop cyny z dodatkami różnych metali, jak ołów lub cynk. Spoiwo lutownicze może przyjąć formę drutu, rurki lub pasty. Przed rozpoczęciem lutowania należy przygotować lut, poprzez odważenie jego odpowiedniej ilości, rozgrzaniu go w specjalnym palniku lub z użyciem lutownicy i przemieszczeniu go po powierzchni łączonych elementów, aż do uzyskania jednorodnej masy.
- Nagrzanie elementów  
Łączone podczas procesu lutowania elementy należy rozgrzać do odpowiedniej temperatury, aby umożliwić rozpuszczenie spoiwa lutowniczego, w celu ich połączenia ze sobą. Najczęściej do lutowania miękkiego stosuje się różnego rodzaju lutownice lub palniki gazowe. W zależności od grubości łączonych elementów oraz od rozmiaru szczeliny pomiędzy nimi, wymagane może być różne tempo nagrzewania obu materiałów.
- Nałożenie lutu  
Po osiągnięciu przez łączone elementy odpowiedniej temperatury, na powierzchnię styku nakładany jest lut (spoiwo). Najlepszą metodą jest wykonanie tej czynności wzdłuż całej szczeliny, aby zapewnić jej równomierne pokrycie spoiwem. W przypadku lutowania innych elementów jak np. rurek lub przewodów, w miarę możliwości lut można wcześniej nałożyć na oba łączone końce, by ułatwić ten proces.
- Ochłodzenie i usuwanie nadmiaru lutu



Po nałożeniu lutu, należy schłodzić łączone elementy do temperatury otoczenia. Lut twardnieje dość szybko w przedziale od kilku sekund do kilku minut, tworząc trwałe połączenie pomiędzy tymi elementami. W przypadku, gdy nałożono zbyt dużo lutu, to wtedy należy go usunąć za pomocą skrobaka lub papieru ściernego, aby uzyskać płaską oraz gładką powierzchnię połączenia.

- **Czyszczenie i wykończenie**

Na zakończenie procesu lutowania należy dokładnie oczyścić powierzchnię łączonych elementów oraz ich połączenie z resztek lutu i innych zanieczyszczeń.

## **2.5. Narzędzia zarządzania jakością**

Narzędzia zarządzania jakością [3] są kluczowe dla efektywnego monitorowania i usprawniania procesów produkcyjnych i biznesowych. Wśród różnych metod można wymienić diagram Ishikawy, diagram Pareto, karty kontrolne Shewharta czy metoda 5 Whys. Diagram Pareto to graficzne narzędzie wykorzystywane do identyfikowania najważniejszych przyczyn problemów, oparte na zasadzie 80/20. Pozwala na skoncentrowanie się na tych obszarach, które przynoszą największe korzyści w zakresie poprawy jakości [11]. Karty kontrolne Shewharta są narzędziem do monitorowania procesów produkcyjnych w czasie rzeczywistym do identyfikowania odchyleń od normy i szybkiego reagowania na występujące problemy, co pozwala utrzymać wysoką jakość wyrobów [12]. Metoda 5 Whys to technika rozwiązywania problemów oparta na zadawaniu serii pytań „dlaczego”, która pozwala na dotarcie do głębszych przyczyn problemów jakości. Jest to proste narzędzie, które może być stosowane na różnych etapach procesów produkcyjnych. Diagram Ishikawy szczególnie wyróżnia się wśród tych narzędzi ze względu na swoją elastyczność i wizualność. Działa na zasadzie grupowania przyczyn problemów jakości w kategorii, takie jak ludzie, maszyny, metody, materiały, środowisko i pomiary. Diagram Ishikawy, również określany jako diagram rybiej ości, to opracowana przez japońskiego profesora Ishikawę metoda rozwiązywania problemów przy wykorzystaniu wykresu o charakterze przyczynowo-skutkowym. Diagram ten ukazuje graficzną analizę wpływu wielu różnych czynników, a także ich wzajemnych zależności, przyczyniających się do powstawania określonych problemów o charakterze jakościowym. Pomimo wstępnych założeń, że diagram Ishikawy został stworzony w celu kontrolowania jakości, można go również z powodzeniem wykorzystywać w sytuacjach, gdzie konieczne jest znalezienie przyczyn problemów oraz wykrycie wąskich gardeł w procesach produkcyjnych. Składa się on z osi poziomej reprezentującej skutek, czyli problem lub wyzwanie, które jest badane, oraz osi pionowych reprezentujących przyczyny, które doprowadziły do tego problemu. Przyczyny są zwykle podzielone na kilka kategorii, takich jak ludzie, procesy, maszyny, materiały, metody lub środowisko, w zależności od charakteru analizowanego problemu. Przy tworzeniu diagramu Ishikawy stosuje się metodę brainstormingu, podczas której grupa ludzi zgłasza pomysły i przyczyny, które wpłynęły na dany problem lub wyzwanie. Następnie te przyczyny są wprowadzane na diagram w odpowiedniej kategorii, a każda przyczyna jest związana z linią prowadzącą do osi poziomej.

### **3. CEL I ZAKRES REALIZOWANYCH DZIAŁAŃ W OBSZARZE PROCESU PRODUKCYJNEGO W AUTOMACIE COMBITRANS**

Podczas procesu produkcyjnego w automacie Combitrans występują niezgodności z założonymi wymaganiami jakościowymi. Skutkuje to odrzucaniem elementów podczas cyklu produkcyjnego, co powoduje powstawanie strat materiałowych. Celem podjętych działań jest zredukowanie ilości powstających wad, a w związku z tym odnalezienie przyczyny powstawania wad oraz zaproponowanie optymalizacji procesu. Aby osiągnąć założoną optymalizację przeanalizowano oraz zweryfikowano dokumentację produkcyjną, aby odnaleźć, w którym miejscu procesu produkcyjnego pojawiają się niezgodności. Podstawowe działania rozpoczęto od utworzenia tabeli wszystkich wad występujących w procesie produkcyjnym, którą podzielono na kategorie. Następnie zapisano ilości powstających wad w każdej kategorii. Dzięki wykonaniu takiej analizy stwierdzono, że najczęściej występuje wad elektrycznych, dlatego rozpoczęto optymalizację procesu lutowania, a nie innych, ponieważ wady elektryczne mogą wystąpić tylko podczas procesu lutowania. Kolejnym krokiem było zapoznanie się z budową i zasadą działania stacji lutowniczej. Wykorzystano diagram Ishikawy dla procesu lutowania, aby odnaleźć jakie czynniki mogą skutkować powstawaniem wad produkcyjnych. Za pomocą mapy procesu lutowania, wyznaczono niekontrolowane czynniki, które mogły mieć wpływ na powstawanie wad elektrycznych. Równoległe przeprowadzono analizę wad elektrycznych – wyznaczono jakie wady powstają i jakie czynniki je powodują. Zlokalizowano problem, który występował w braku stabilności stacji lutowniczej oraz zgromadzono dokumentację techniczną stacji lutowniczej po to, aby wykonać uchwyt mocujący stację lutowniczą.

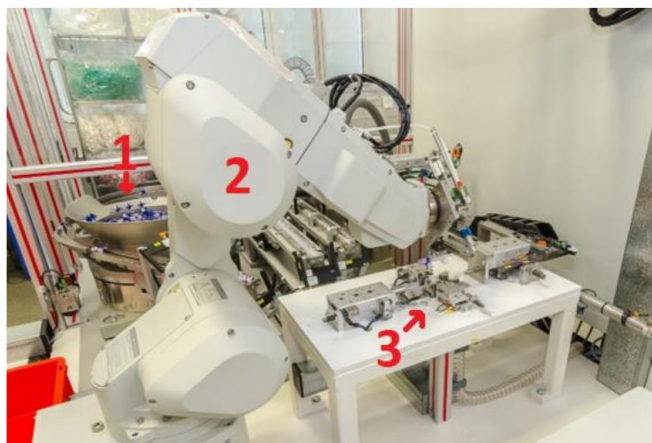
#### **3.1. Budowa automatu Combitrans**

Działania jakie podjęto w niniejszym artykule w głównej mierze były realizowane w filii niemieckiego koncernu medycznego i farmaceutycznego, która działa na polskim rynku. W produkcji, firma ta głównie wykorzystuje ALP Combitrans, czyli urządzenie do produkcji przetworników do inwazyjnego pomiaru ciśnienia krwi. Automat ten składa się z 3 segmentów produkcyjnych (robotów produkcyjnych), transportera oraz szafy sterowniczej i obudowy. Roboty przemysłowe jakie zastosowano w tym przypadku to jednostki firmy Mitsubishi Melfa RV-6S, które są najszybsze w swojej klasie – prędkości rzędu 9,6m/s. Ich zastosowanie sprawia, że na linii produkcyjnej na jednym stanowisku można realizować wiele złożonych, skomplikowanych operacji. Ponadto tego typu jednostki charakteryzują się wysoką nośnością do 12kg, wysoką precyzją kontroli ruchu, ze względu na swoją budowę mogą być używane niemalże w każdych warunkach środowiskowych. Długość ramienia 696mm, ładowność 6/12kg, maksymalna prędkość kompozytowa 8500/9600mm/s, średni czas cyklu wynosi 0,6/0,7s, powtarzalność pozycji  $\pm 0,02/\pm 0,05$ mm, zaś waga w zależności od oprzyrządowania wynosi od 60 do 93kg. Podstawowe zastosowania dla tego typu jednostek to obsługa części, montaż części – czyszczenie, spryskiwanie, opieka nad maszynami, obsługa materiałów, gratowanie, itp. 3 segmenty produkcyjne odpowiadają odpowiednio: jednostce produkcyjnej 1, 2 i 3.

#### Jednostka produkcyjna numer 1:

Na załączonym rysunku (Rys. 3) przedstawiono ramię robota jednostki produkcyjnej numer 1 podczas procesu montażu kranika z obudową górną. Jednostka produkcyjna 1 odpowiada za montaż systemu płuczącego, kranika z obudową górną przetwornika oraz transport złożonego podzespołu do gniazda wklejania czujnika na transporterze. Elementami składowymi jednostki produkcyjnej numer 1 są:

- 3 systemy wibracyjne doprowadzania i pozycjonowania komponentów,
- ramię robota z wielofunkcyjnymi chwytakami oraz jednostka dozująca rozpuszczalnik,
- stacja montażowa komponentów,
- system przechowywania i doprowadzania rozpuszczalnika.



*Rys. 3. Jednostka produkcyjna numer 1 (1 – system wibracyjny doprowadzania i pozycjonowania komponentów, 2 – ramię robota z wielofunkcyjnym chwytakiem, 3 – stacja montażowa komponentów)*

#### Jednostka produkcyjna numer 2:

Na załączonym rysunku (Rys. 4) przedstawiono taśmę transportową, robota produkcyjnego, tester elektryczny oraz część stacji lutowniczej.



Rys. 4. Jednostka produkcyjna numer 2 ( 1 – taśma transportowa, 2 – robot produkcyjny, 3 – tester elektryczny, 4 – fragment stacji lutowniczej)

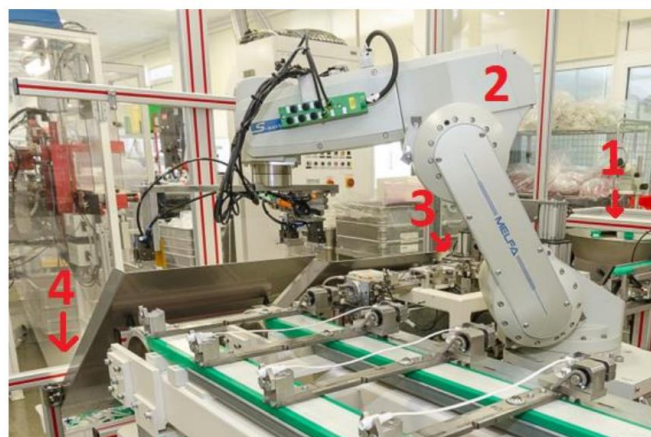
Jednostka produkcyjna 2 odpowiada za lutowanie przewodu z czujnikiem, testowanie poprawności operacji lutowania oraz transport i montaż podzespołu w gnieździe wklejania czujnika. Jednostka produkcyjna numer 2 składa się z:

- systemu transportu i pozycjonowania przewodów do stacji lutującej wraz z systemem podawania sensora z taśmy transportowej,
- ramienia robota z wielofunkcyjnymi chwytakami,
- stacji lutowniczej, urządzenia chłodzącego stację lutującą oraz dozownika pasty lutowniczej,
- testera elektrycznego.

Jednostka produkcyjna numer 3:

Na załączonym rysunku (Rys. 5) przedstawiono robota produkcyjnego transportującego gotowe przetworniki do pojemnika na gotowy produkt. Jednostka produkcyjna numer 3 jest końcowym elementem w procesie montażu, ponieważ jej głównym zadaniem jest łączenie elementów obudowy dolnego urządzenia oraz sprawne wydanie gotowego produktu. Jednostka produkcyjna numer 3 składa się z:

- systemu wibracyjnego doprowadzania i pozycjonowania komponentu,
- ramienia robota z wielofunkcyjnymi chwytakami wraz ze stelażami na gotowy produkt,
- stacji pozycjonowania i montażu komponentu wraz z systemem transportu przewodów do bębna obrotowego.



*Rys. 5. Jednostka produkcyjna numer 3 (1 – wibracyjny system pozycjonowania komponentów, 2 – ramie robota z wielofunkcyjnymi chwytakami, 3 – stacja pozycjonowania komponentów, 4 – stelaż na gotowy produkt)*

Dodatkowo do automatu podłączone są peryferia: klimatyzator wewnętrzny odpowiedzialny za utrzymanie odpowiedniej temperatury wewnątrz urządzenia (Rys. 6) oraz chłodnica płynu lutownicy odpowiedzialna za chłodzenie pętli indukcyjnej (Rys. 7).



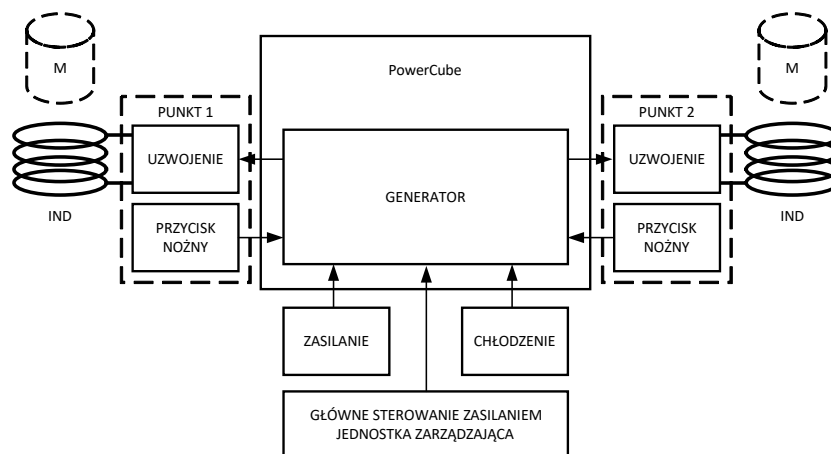
*Rys. 6. Klimatyzator wewnętrzny*



Rys. 7. Chłodnica płynu lutownicy

### 3.2. Budowa stacji lutowniczej

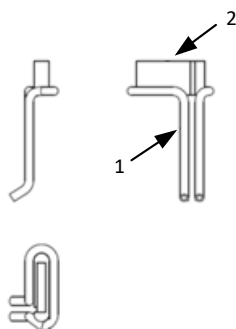
Lutowanie w automacie Combitrans jest związane z działaniem stacji lutowniczej. Stacja lutownicza to współpracuje dwóch głównych elementów – generatora PowerCube (Rys. 8) oraz pętli indukcyjnej (Rys. 9).



Rys. 8. Schemat blokowy generatora PowerCube

Zadaniem generatora jest wytworzenie pola elektromagnetycznego, które można dowolnie programować w zależności od potrzeb. Za jego pracę odpowiada mikrokomputer,

który monitoruje urządzenie za pomocą jednostki samo-diagnostycznej sygnały i maszynę. Do generatora podłączone są peryferia (strzałki na rys. 8 skierowane do generatora) takie jak zasilanie oraz chłodzenie. Chłodzenie odpowiada za utrzymanie odpowiedniej temperatury pracy generatora jak i pętli. Generator może obsługiwać dwie pętle indukcyjne czyli „Punkty”. W naszym urządzeniu generator PowerCube steruje uzwojeniem numer 1. W punkcie „1” znajduje się pętla lutownicza (Rys. 9), która skupia w sobie energię potrzebną do połączenia elementów. Uzwojenie pętli indukcyjnej wykonane jest z miedzi. Wewnątrz pętli indukcyjnej znajduje się rdzeń ferromagnetyczny, który skupia energię w punkcie. Pętla jest chłodzona cieczą, do temperatury około 23°C, która pozwala na optymalną pracę stacji lutowniczej. Uzwojenie ma nadany odpowiedni kształt wynikający z wymagań procesu produkcyjnego oraz optymalizacji procesu.



Rys. 9. Pętla indukcyjna  
(1 – miedziana rurka, 2 – cewka z rdzeniem ferromagnetycznym)

### 3.3. Proces lutowania w automacie Combitrans

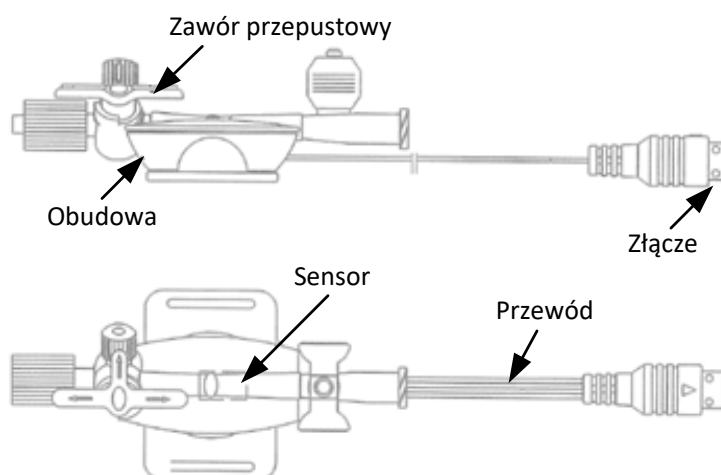
Proces lutowania to jedna z kilku składowych wytwarzania przetwornika Combitrans. Przebieg tego procesu został opisany poniżej:

- początkowo operator umieszcza kabel w podajniku, wstępnie ocynowany przez producenta, który transportowany jest do obracającego się bębna,
- w kolejnym kroku podajnik podciśnieniowy wyjmuje i przenosi sensor z taśmy tape&reel i umieszcza go w punkcie odbiorczym. Następnie ramie robota transportuje sensor w miejsce dozowania pasty lutowniczej. Położenie oraz ilość pasty sprawdzane jest czujnikiem wizyjnym. Po uzyskaniu pozytywnego wyniku kontroli, czujnik umieszczony jest w gnieździe montażowym stacji lutującej,
- równoległe obracac ustawia przewód w odpowiedniej pozycji. Układ siłowników wykonując ruchy przód-góra dosuwa sensor do przewodu i rozpoczyna się proces lutowania,
- podczas przesuwu pasta lutownicza jest wstępnie rozgrzewana,

- w pętli lutownicy indukcyjnej wstawiana jest cewka z rdzeniem ferrytowym, który skupia energię w odpowiednim punkcie. W tym punkcie ustawione są bielone żyły przewodu oraz wyprowadzenia układu z zadozowaną pastą lutowniczą, która roztopiona jest indukcyjnie,
- lutowane elementy łączone są za pomocą pneumatycznego docisku,
- po określonym czasie grzania następuje wyłączenie lutownicy. Produkt jest dociskany, aby utrwalić lutowane połączenie,
- po zlutowaniu następuje kontrola połączenia lutowanego. Sprawdzane są dwie cechy: brak zwarcie oraz ciągłość układu sensor-kabel.

### 3.4. Przetwornik Combitrans

Przetwornik Combitrans składa się z kilku podstawowych elementów, które współpracują ze sobą w celu dokładnego i ciągłego monitorowania ciśnienia fizjologicznego. Od lewej (Rys. 10) są to zawór przepustowy, sensor, przewód oraz złącze.



Rys. 10. Schemat przetwornika Combitrans

Przewód łączący przetwornik Combitrans z monitorem pacjenta jest istotnym elementem systemu, który przekazuje sygnał elektryczny z czujnika ciśnienia do monitora. Przewody są zwykle wykonane z elastycznego, biokompatybilnego materiału, często z poliuretanu lub innego tworzywa sztucznego o podobnych właściwościach. Przewód może być osłonięty materiałem ekranującym, który chroni sygnał przed zakłóceniami elektromagnetycznymi. Wewnątrz przewodu znajdują się przewodzące ścieżki wykonane z miedzi lub srebra, które są odpowiedzialne za przesyłanie sygnału elektrycznego. Przewody muszą być wytrzymałe, elastyczne i odporne na ścieranie, aby zapewnić długotrwałe i niezawodne działanie. Natomiast, zintegrowany czujnik ciśnienia (sensor) jest kluczowym elementem przetwornika Combitrans. W większości przypadków opiera się on na technologii



piezorezystancyjnej, która wykorzystuje zmiany oporu elektrycznego w odpowiedzi na zmieniające się naprężenie mechaniczne. Zintegrowane czujniki ciśnienia są wykonane z materiałów półprzewodnikowych, takich jak krzem lub german. W czujnikach półprzewodnikowych, mikroskładniki są wykonywane na podłożu krzemowym przy użyciu technik mikromachiningu. Czujnik zawiera mostek Wheatstone'a złożony z czterech rezystorów piezorezystancyjnych. Gdy ciśnienie oddziałuje na czujnik, mostek Wheatstone'a [13] ulega odkształceniu, co prowadzi do zmiany oporu elektrycznego. Ta zmiana oporu jest proporcjonalna do zmiany ciśnienia. Sygnał elektryczny jest następnie wzmacniany i przesyłany do monitora pacjenta. Kolejnym elementem jest złącze, które umożliwia podłączenie przetwornika Combitrans do monitora pacjenta.

Tab. 1. Rodzaje wad występujące w automacie Combitrans

Miejsce wady	Rodzaj wady	Przyczyna
Przetwornik	Nieszczelność	Błąd pracownika
Sensor	Wada elektryczna przetwornika	Automat – klejenie
Kabel	Brak przepływu szybkiego	Automat – lutowanie
Kranik	Przepływ stały nieprawidłowy	Automat – montaż
Górna obudowa	Zniszczenie mechaniczne	Uszkodzony komponent
Dolna obudowa	Pęcherzyki gazowe w materiale	Wada materiału (dostawca)
System płuczący	Niepoprawny montaż	Zanieczyszczenia w maszynie
Inne	Zabrudzenia w materiale	Zanieczyszczony materiał (dostawca)
	Zabrudzenia powierzchni omywanych luźnymi cząstkami	Testy
	Odchylenie nasycenia barw	Inne
	Brak przejrzystości okna przetwornika	
	Inne	

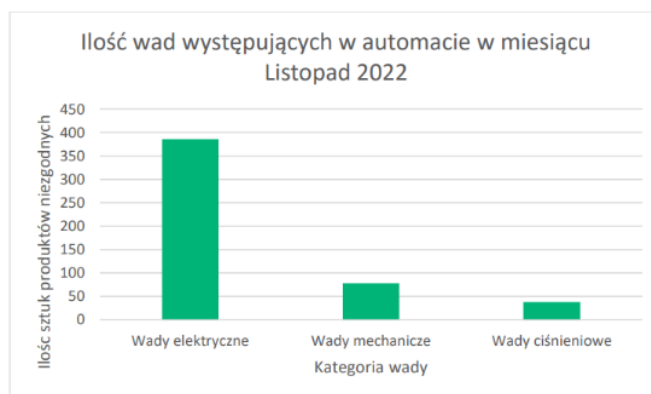
Tego typu złącza są zwykle wykonane z materiałów odpornych na korozję, takich jak stopy metali szlachetnych, np. złota lub platyny. Mogą być także wykonane ze stali nierdzewnej lub mosiądzu pokrytego złotem lub srebrem. Złącza te są zaprojektowane tak, aby zapewnić pewne i szybkie łączenie, a jednocześnie utrzymać stabilny kontakt elektryczny. Istnieje wiele różnych rodzajów złączy, które mogą być kompatybilne z różnymi rodzajami urządzeń medycznych. Ostatnim elementem jest obudowa, która pełni funkcję zabezpieczającą czujnik ciśnienia oraz umożliwia zamocowanie przetwornika. Dzięki

przezroczystej obudowie możliwa jest ciągła kontrola pracy takiego przetwornika. W skład obudowy wchodzi również zawór przepustowy.

#### 4. ANALIZA POWSTAŁYCH WAD

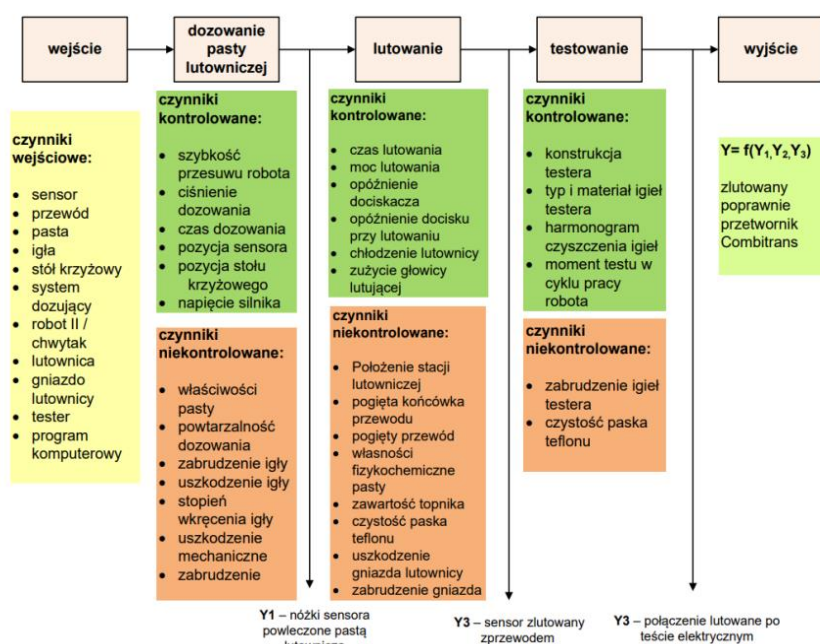
Podczas procesu produkcji przetworników Combitrans dochodzi do powstania produktów niezgodnych z wymaganiami jakościowymi. Z powodu zgłaszanych reklamacji, pracownicy produkcji oraz działu kontroli jakości zostali poproszeni o zapisywanie wszelkich niezgodności. Na podstawie informacji od pracowników oraz wymagań jakościowych stawianych produktom medycznym stworzono poniższą tabelę zawierającą różnego rodzaju produkty wadliwe. Wszystkie miejsca powstawania wad oraz rodzaje produktów niezgodnych zdefiniowano w Tab 1. Stwierdzenie, w którym momencie procesu powstaje najwięcej wad wymaga podzielenia powyższych niezgodności na 3 kategorie (Tab 1). Operatorzy gniazd produkcyjnych zostali poinformowani i poproszeni, aby przez okres miesiąca zapisywać ilość sztuk niezgodnych w danej kategorii:

1. Wady mechaniczne – są to wady typu uszkodzony komponent, wada materiału lub zanieczyszczenia występujące w maszynie lub materiale. Wykrywane są przez operatorów lub dział Kontroli Jakości. Aby zredukować liczbę wad mechanicznych operatorzy sprawdzają każdy przewód pod kątem zanieczyszczeń.
2. Wady elektryczne – są to wady powstałe podczas procesu lutowania np. zwarcie elektryczne lub brak ciągłości przewodu. Wykrywane są w dwóch miejscach: podczas lutowania sensora z przewodem, oraz po procesie produkcyjnym na dziale Kontroli Jakości. Aby zredukować ilość wad elektrycznych część kabli dostarczanych od producenta jest sprawdzana pod kątem ciągłości przewodu przez dział Kontroli Jakości.
3. Wady ciśnieniowe – są to wady typu nieszczelność przetwornika podczas kontroli ciśnieniowej lub brak przepływu szybkiego. Wady te wykrywane są przez dział Kontroli Jakości na specjalnie przygotowanych urządzeniach.



Rys. 11. Ilość wad z podziałem na rodzaj wady występujące w automacie Combitrans

Na wykresie, który został przygotowany na podstawie informacji uzyskanych od operatorów urządzenia (Rys. 11) przedstawiono ilość niezgodności występujących w automacie Combitrans w miesiącu Listopad 2022. Z wykresu wynika, że przeważająca ilość niezgodności zakwalifikowano do kategorii wad elektrycznych. Natomiast wad mechanicznych lub ciśnieniowych występuje dużo mniej. Na podstawie wykonanej analizy stwierdzono, że za największą ilość wad odpowiada kategoria „wady elektryczne”, i dlatego tymi wadami zajęto się w realizowanym projekcie jako pierwszymi, ponieważ ich eliminacja może przynieść największą poprawę niezawodności procesu.



Rys. 12. Mapa procesu lutowania

#### 4.1. Wykorzystanie mapy procesu lutowania oraz diagramu Ishikawy

Analizę procesu lutowania rozpoczęto od wykonania mapy procesu (Rys. 12) z podziałem na czynniki kontrolowane oraz niekontrolowane. Celem analizy było wyznaczenie, który z czynników może mieć wpływ na występowanie niezgodności elektrycznych. Proces lutowania składa się z 5 operacji: wejścia, dozowania pasty lutowniczej, lutowania, testowania oraz wyjścia. Są to główne elementy procesu, w których zostały wyodrębnione czynniki kontrolowane i niekontrolowane. Dzięki zastosowaniu mapy procesu lutowania w konkretnych momentach procesu lutowania znaleziono oraz wypunktowano czynniki niekontrolowane co pozwoliło zawęzić obszar poszukiwań. Poniżej przedstawiono te czynniki, które wypunktowano na etapie:

- dozowania pasty lutowniczej

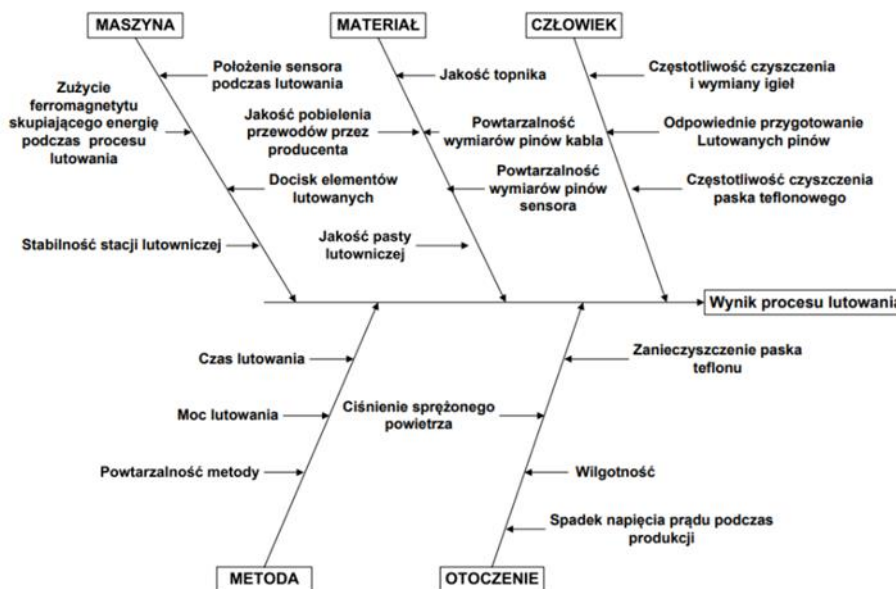
Czynniki niekontrolowane – właściwości pasty, powtarzalność dozowania, zabrudzenie igły, uszkodzenie igły, stopień wkręcenia igły, uszkodzenia mechaniczne, zabrudzenia.

- lutowania

Czynniki niekontrolowane – położenie stacji lutowniczej, pogięta końcówka przewodu, pogięty przewód, własności fizykochemiczne pasty, zawartość topnika, czystość paska teflonu, uszkodzenie gniazda lutownicy, zabrudzenie gniazda.

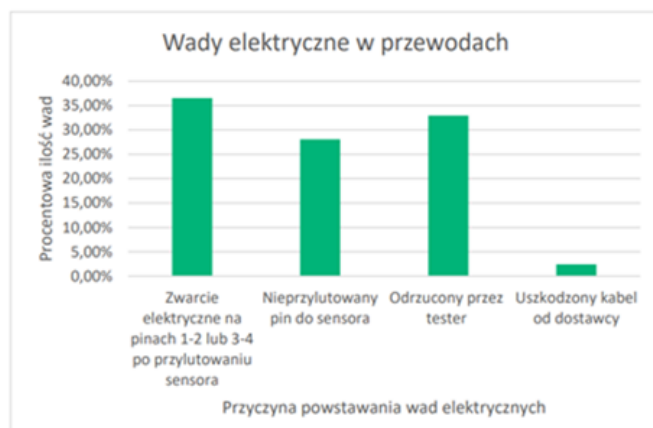
- Testowania

Czynniki niekontrolowane – zabrudzenie igieł testera, czystość paska teflonu.

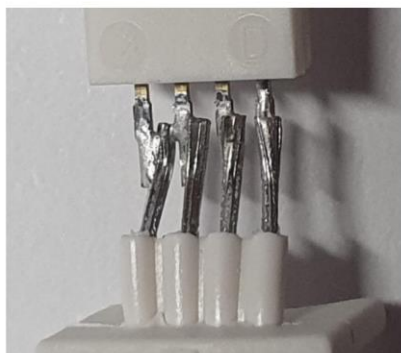


Rys. 13. Diagram Ishikawy

Kolejnym krokiem wykonanym w poszukiwaniu problemu procesu lutowania było zweryfikowanie aktualnego stanu procesu lutowania, a następnie przygotowanie diagramu Ishikawy. Głównym celem tego diagramu było znalezienie potencjalnych przyczyn powstawania niezgodności lutowniczych. Utworzony diagram przedstawiono na rys. 13. Wykorzystując diagram Ishikawy, udało się wykryć pewną wadę w procesie produkcji. Okazało się, że metoda lutowania nie była wystarczająco powtarzalna, co mogło prowadzić do nieprawidłowych połączeń między elementami. Po przeanalizowaniu obydwu diagramów wyciągnięto wniosek: „brak kontrolowania położenia stacji lutowniczej powoduje brak powtarzalności metody co skutkuje powstawaniem produktów niezgodnych z założeniami jakościowymi”.



Rys. 14. Przyczyny występowania wad podczas procesu lutowania



Rys. 15. Zwarcie elektryczne pomiędzy pinami

#### 4.2. Analiza procesu lutowania – przyczyny powstawania wad

Proces lutowania odpowiedzialny jest za powstawanie największego procentu produktów niezgodnych. Na rys. 14 przedstawiono procentowy podział wad elektrycznych dla zlutowanych przewodów z czujnikiem. Na wykresie tym przedstawiono 4 różne przyczyny powstawania wad elektrycznych w przetwornikach Combitrans, są to:

1. Zwarcie elektryczne pomiędzy pinami 1-2 lub 3-4: są to przewody źle zlutowane z sensorem, których metalowe elementy posiadają połączenie elektryczne pomiędzy wyprowadzeniami. Odpowiada za to nieodpowiednie przygotowanie przewodu przez operatora lub przesunięcie stacji lutowniczej, w wyniku którego następujący docisk podczas procesu lutowania powoduje przesunięcie wyprowadzeń (Rys. 15).
2. Nieprzylutowany pin do sensora: są to przewody, których jedna lub więcej żył nie zostały połączone z sensorem. Odpowiada za to nieodpowiednie przygotowanie przewodu przez operatora lub przesunięcie stacji lutowniczej, w wyniku którego

następujący docisk podczas procesu lutowania powoduje przesunięcie wyprowadzeń (Rys. 16).



*Rys. 16. Nieprzylutowany pin pomiędzy przewodem a sensorem*

3. Odrzucone przez tester w robocie produkcyjnym: są to przewody, które testowane są przez tester w próbie zwarciowej oraz ciągłości przewodu. Jeżeli tester wykaże, brak ciągłości obwodu lub zwarcie między pinami to kabel zostaje odrzucony. Również na tym etapie sprawdzany jest sensor. Na rys. 17 przewód jest przylutowany prawidłowo, pomimo tego został odrzucony. Może to wskazywać na uszkodzony sensor lub przewód. Zdarza się również, że wtyczka przewodu nie trafi idealnie do testera wtedy również przetwornik zostaje odrzucony pomimo tego, że jest sprawny.



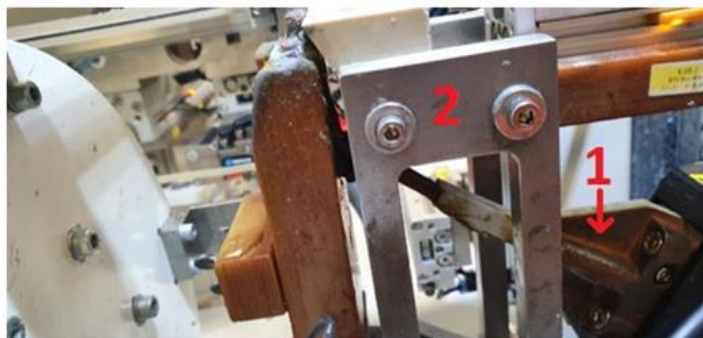
*Rys. 17. Zwarcie elektryczne pomiędzy pinami*

4. Uszkodzony przewód od dostawcy; są to przewody, które zostały dostarczone przez dostawcę uszkodzone lub uszkodziły się w trakcie procesu lutowania. Wewnątrz przewodu występuje zwarcie lub nie zostaje zachowana ciągłość przewodu.

Przeanalizowanie tych wad pozwoliło zauważyć, że proces lutowania posiada problem, który można bardzo łatwo wyeliminować poprzez wykonanie kopyta mocującego, które pozwoli zredukować powstawanie wad numer 1 i 2.

## 5. KONCEPCJA OPTYMALIZACJI PROCESU PRODUKCYJNEGO ORAZ NOWE KIERUNKI BADAŃ

Obecnie w urządzeniu stacja lutownicza zamocowana jest za pomocą 4 śrub w tylnej części stacji (Rys. 18). W wyniku tego typu montażu każdorazowo podczas prac konserwacyjnych przy pętli istnieje ryzyko przesunięcia pętli oraz rdzenia. Optymalizacja przewidyje wykonanie kopyta mocującego, w którym zostanie wyfrezowane miejsce na pętlę indukcyjną, które usztywni całą konstrukcję. W wyniku takiego połączenia stacja lutownicza będzie zawsze mocowana w taki sam sposób. Na rys. 18, kopyto mocujące zostało przytwierdzone do konstrukcji metalowej, a pętla została umieszczona wewnątrz kopyta. Dodatkowo dzięki zaproponowanemu rozwiązaniu pętlę indukcyjną można będzie przekładać w razie potrzeby (serwis, naprawa) bez konieczności dodatkowych regulacji.



Rys. 18. Stacja lutownicza w urządzeniu do produkcji Combitrans  
(1 - stacja lutownicza, 2 – metalowa konstrukcja)

Wykonanie takiego kopyta ma na celu usztywnienie konstrukcji oraz spowodowanie zwiększenia powtarzalności procesu, ponieważ nie byłoby możliwości przesunięcia stacji. Należy zwrócić uwagę, że miedziana rurka, z której wykonana jest pętla indukcyjna jest plastyczna, więc w sytuacji przyłożenia do niej siły można ją „wygiąć”. Celem uchwytu mocującego do stacji lutowniczej jest zapobiegnięcie takiej sytuacji. Optymalizacja stacji lutowniczej zakładała wykonanie modelu 3D, wykonanie kopyta oraz zamocowanie go w urządzeniu i wykonanie testów. Ze względu na ilość zamówień oraz tryb pracy automat (24h/7d) na chwilę obecną nie udało się przeprowadzić zakładanych testów.

Skutkiem realizacji optymalizacji procesu lutowania, a więc wykonanych analiz, zastosowania i wyciągnięcia wniosków z przygotowanego diagramu Ishikawy oraz mapy procesu produkcyjnego są nowe koncepcje dotyczące usprawnienia procesu lutowania:

- koncepcja 1 - wykonanie testera, który sprawdza połączenia przed lutowaniem. Dzięki takiemu testerowi przewody lub sensory z źle ułożonymi wyprowadzeniami byłyby odkładane do opisanego pojemnika, co pozwoliłoby wykorzystać je jeszcze raz w procesie produkcyjnym. Obecnie jest nieważne, w którym momencie produkcyjnym sensor lub

przewód są odrzucane – później już nigdy nie są wykorzystywane ponownie. Taka automatyzacja mogłaby zredukować ilość odpadu produkcyjnego.

- koncepcja 2 - optymalizacja testera, ze względu na dokładną analizę wad elektrycznych zauważano, że tester odpowiada za 32,97% przyczyn powstawania wad. Na rys. 19 przedstawiono wtyczkę przewodu wraz z testerem. Zauważono, że podczas procesu produkcyjnego może zdarzyć się sytuacja, że wtyczka nie „wejdzie” do końca testera co skutkuje odrzuceniem przetwornika.



Rys. 19. Tester elektryczny w automacie Combitrans

## PODSUMOWANIE

Podstawowym celem realizowanych działań była optymalizacja procesu lutowania w zakresie redukcji frakcji niezgodności oraz strat materiałowych. Podczas procesu produkcyjnego zauważano występującą dużą ilość niezgodności elektrycznych. Pierwszym krokiem było stworzenie katalogu wad oraz podzielenie go na kategorie co wiązało się z weryfikacją oraz analizą dokumentacji produkcyjnej. Pozwoliło to na uzyskanie informacji o dużej ilości wad elektrycznych. W drugim etapie pracy po zapoznaniu się z budową i zasadą działania stacji lutowniczej przeprowadzono jej analizę za pomocą diagramu Ishikawy oraz mapy procesu produkcyjnego. Analizy wskazały na brak powtarzalności procesu lutowania, związanej z brakiem stabilnego mocowania stacji lutowniczej. Następnie przeprowadzono optymalizację procesu lutowania poprzez wykonanie stabilnego mocowania. Celem optymalizacji była redukcję powstających wad oraz strat materiałowych. Z powodu braku możliwości przetestowania rozwiązania – konieczność produkcji na automacie Combitrans wynikającą z dużej ilości zamówień na chwilę obecną nie udało się przeprowadzić zakładanych analiz i testów. Optymalizacja z pewnością zredukowałaby powstawanie niezgodności oraz zredukowałaby straty materiałowe. Przeanalizowanie i zapoznanie się z procesem pozwoliło na zaproponowanie innych optymalizacji, takich jak: poprawienie konstrukcji testera, które zredukowałoby ilość powstających wad oraz



zamontowanie urządzenia do sprawdzania pinów przewodów oraz sensora, aby zredukować liczbę niepotrzebnie lutowanych przetworników. W efekcie końcowym można stwierdzić, że podstawowe założenia w realizowanym projekcie zostały zrealizowane.

## LITERATURA

- [1] **A. Bujok**, *Zasady zarządzania jakością poprzez orientację na klienta wg. ENPN ISO 9001:2015*, 2019
- [2] **W. Wrotek**, *Lutowanie od podstaw*. Wydanie II, Helion, 2022
- [3] **S. Wawak**, *Zarządzanie jakością*. Podstawy, systemy i narzędzia, Helion, 2011
- [4] **J. Gawlik, J. Plichta, A. Świć**, *Procesy produkcyjne*, PWN, 2013
- [5] <https://forbot.pl/blog/kurs-lutowania-pierwszy-raz-z-lutownica-czeste-ble-dyid12287>
- [6] PN-EN ISO 9453:2021-04 - wersja angielska, 2021
- [7] PN-EN 12797:2002 – wersja polska, 2002
- [8] PN-EN 13067:2021-02 - wersja angielska, 2021
- [9] PN-EN 13134:2004 - wersja polska, 2004
- [10] <https://strefainzyniera.pl/arttykul/1048/lutowanie>
- [11] **K. Kowalik**, *Diagram Pareto Lorenza w teorii i praktyce zarządzania jakością*, 2018  
**RT. Samuel, J. Jpignatello**, *Identifying the time of a step change with X control charts*, <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/08982119808919166>
- [12] **C. Platt, F. Jansson**, *Encyklopedia elementów elektronicznych. Tom 3. Czujniki orientacji, ingerencji i właściwości otoczenia*, Helion, 2022

# **AUTOMATYZACJA PROCESU TRANSPORTU I PAKOWANIA BUTELEK PET W ROZLEWNI WODY–STUDIUM PRZYPADKU**

## **1. WPROWADZENIE**

Proces projektowania maszyn i urządzeń określany jest przez wielu autorów jako szereg działań ukierunkowanych na opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych spełniające zdefiniowane wymagania. Ważnym etapem powinna być właściwa identyfikacja potrzeb oraz ustalenie warunków pracy maszyny, wymagania funkcjonalne, techniczne, ekonomiczne oraz w efekcie końcowym kryteria oceny. Ze względu na różne możliwe rozwiązania danego problemu technicznego, koncepcje rozwiązań, trudno jest jednoznacznie intuicyjnie wskazać właściwe najlepsze rozwiązanie, dlatego tak ważna jest ocena koncepcji wg przyjętych kryteriów. Metodyka wyboru może być różna w zależności stopnia skomplikowania urządzenia lub sposobów realizacji funkcji urządzenia. Istnieje wiele metod wspomagających analizy i oceny zbioru koncepcji np. metoda morfologiczna [1], metoda oparta na funkcjach [2], metoda ważenia kryteriów [3], synektyka [4]. Wyniki procesu koncepcyjnego myślenia dla projektowanych maszyn i układów automatycznych: roboczych i sterujących stanowią podstawę do dalszych etapów projektowania z wykorzystaniem systemów CAD (np. Inventor, Solid Works) oraz systemów umożliwiających budowę cyfrowych modeli symulacyjnych dla układów pneumatyki jak np. FESTO FluidSIM. Program Fluid SIM służy do tworzenia i symulacji automatycznego sterowania, takich jak: elektropneumatycznych, elektrohydraulicznych, cyfrowych i elektronicznych.

### **1.1 Opis przypadku i przyjęte główne założenia metodologiczne**

Przedmiotem analizy jest system transportu i pakowania napęcznionych butelek PET w rozlewni wody. Projektowany i zautomatyzowany system transportowy odbywa się pomiędzy stanowiskiem: napełniania i zakręcania butelek (tzw. triblok), a stanowiskiem pakująco-zgrzewającym. Analiza dotyczy wirtualnej, zbudowanej przez autorów pracy linii technologicznej. Dwa główne urządzenia: triblok oraz zgrzewarka mają przyjętą i ustaloną odległość od siebie na hali. W pracy przeprowadzono analizę przypadku transportu wewnętrznego (wirtualny model CAD, program Inventor) Określono cele/etapy: założenia projektowe, wybór najlepszej koncepcji-metoda ważenia kryteriów, dobór przenośnika taśmowego, analiza, symulacja elektro-pneumatycznych układów sterowania (FluidSIM), dobór środków technicznych: wykonawczych i sterujących. Wszystkie te działania mają na celu pełną automatyzację działania przenośnika oraz strefy pakującej butelki PET przed

zgrzewaniem pakietów oraz budowa finalnej wersji modelu linii transportowej – CAD. Wiedza uzyskana dzięki prezentowanej analizie przypadku może posłużyć do lepszego zrozumienia zagadnienia projektowania zautomatyzowanych linii transportowych opartych na elementach wykonawczych oraz czujnikach. Prezentowana metodologia i wyniki mogą także posłużyć do ulepszenia już istniejących zautomatyzowanych linii produkcyjnych w rozlewni wody i podobnych zastosowaniach.

## 2. WYMAGANIA STAWIANE URZĄDZENIU

### 2.1 Analiza głównych urządzeń linii technologicznej

Za początek linii technologicznej rozlewni wody należy uznać ujęcie wody podziemnej oraz urządzenia odpowiadające za pobór wody z ujęcia i dostarczenie jej z żadaną wydajnością do układu hydraulicznego rozlewni. Ze względu na brak istotnych powiązań między tym odcinkiem linii a przedmiotem pracy, ograniczono analizę oraz modelowanie linii do urządzeń znajdujących się wewnątrz hali produkcyjnej rozlewni (Rys.1).

Następnym odcinkiem linii technologicznej jest grupa urządzeń odpowiadających za ustalenie składu wody. Najważniejszym zadaniem tego odcinka jest obniżenie ilości substancji rozpuszczonych w wodzie do poziomu zgodnego z polskimi przepisami sanitarnymi dotyczącymi jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. W tym przypadku jedynym pierwiastkiem rozpuszczonym w wodzie, którego ilość wykracza poza normę jest żelazo. Aby obniżyć wartość ilościową tego składnika najpierw należy dodać do wody powietrze w celu utlenienia związków żelaza. Powietrze jako lżejsze od wody, gromadzi się w górnej części zbiorników i ulatuje przez odpowietrzniki znajdujące się na szczytach separatorów.

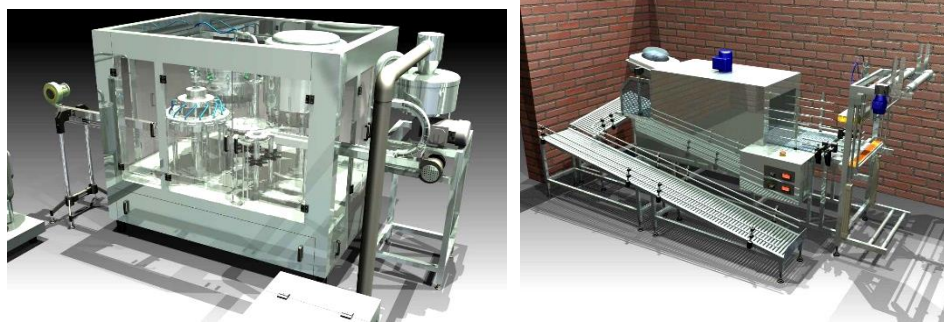
Proces mycia, napełniania i zakręcania butelek PET realizowany jest przez jedno urządzenie, a mianowicie przez tzw. triblock. Maszyna pracuje z wydajnością 4000 butelek/h, a jej działanie jest w pełni automatyczne. Budowa urządzenia jest bardzo zwarta, a podzespoły odpowiadające za realizację procesów mycia, nalewania i zakręcania są zabudowane w korpusie (Rys. 2a). Pracę urządzenia można kontrolować, obserwując jej pracę przez zamontowane w korpusie szklane drzwiczki. Urządzenie dodatkowo wyposażone jest w dwa transportery: specjalny transporter ślizgowy oraz transporter płytkowy. Puste butelki mogą być podawane na maszynę ręcznie lub pobierane automatycznie ze specjalnego kosza magazynowego. Nakrętki pobierane są wyłącznie automatycznie z pojemnika magazynowego. Tak przygotowane nakrętki mogą być nałożone i zakręcone na butelki. Umyte, wypełnione wodą i zakręcone butelki PET wyjeżdżają z maszyny na transporterze płytkowym (zespół dobierany wraz z projektowanym system zautomatyzowanym), który przekazuje je do kolejnej strefy linii produkcyjnej (zgrzewarki).

Proces układania i pakowania napełnionych i zakręconych butelek PET realizowany jest przez urządzenie potocznie nazywane zgrzewarką (Rys. 2b). Wymagane jest w analizowanym przypadku dodatkowe urządzenie układające butelki w pakiety po 12 sztuk. Pakiety owijane są folią termokurczliwą rozwijaną z dwóch osobnych rolek. Specjalne zgrzewadło obcina i łączy ze sobą dwa pasy folii. Następnie pakiet jest transportowany przez przenośnik siatkowy wewnątrz tunelu grzewczego, gdzie pod wpływem wysokiej

temperatury folia obkurcza się na pakiecie butelek. Za tunelem następuje chłodzenie gorącej folii strumieniem powietrza z wentylatora. Po ochłodzeniu uzyskujemy sztywne i trwałe opakowanie butelek. Gotowe pakiety transportowane są grawitacyjnie przenośnikiem rolkowym do strefy odbioru.



*Rys. 1. Linia technologiczna rozlewni wody*



*a)*

*b)*

*Rys. 2. Zespół triblocka: płukanie, nalewanie, zakręcanie (a), zgrzewarka pakietów (b)*

## 2.2 Wymagania stawiane projektowanej linii transportowej

Dla projektowanej zautomatyzowanej linii transportowej ustalono podstawowe wymagania, które można zestawić w następujących grupach: funkcjonalne, wymiarowe, konstrukcyjne, ekonomiczne.

**Wymagania funkcjonalne:** urządzenie musi być zdolne do pobierania z jednorzędowego transportera butelek PET podawanych w sposób ciągły, układania ich w pakiety oraz przekazywania na zgrzewarkę. Masa jednej butelki PET wypełnionej wodą wynosi 527g, stąd masa pakietu równa się 6324g. Pakiety mają się składać z 12 butelek o pojemności 0,5l poukładanych w trzech rzędach po cztery butelki w każdym. Kształt gotowego pakietu nie może wykraczać poza pole prostokąta o wymiarach 19cm x 25cm. Wydajność maszyny powinna być nie mniejsza niż wydajność triblocka (4000 butelek na godzinę), a jej praca w pełni automatyczna.

**Wymagania wymiarowe:** automat ma być gabarytowo przystosowany do hali produkcyjnej oraz do adaptacji z maszyną pakującą (wysokość stołu musi być równa wysokości maszyny pakującej). Reasumując, wymiary zewnętrzne, jakie powinna posiadać maszyna segregująco/pakująca, to (max 100cm) x (max 120 cm) x 86cm.

**Wymagania konstrukcyjne:** niektóre elementy urządzenia mogą być narażone na bezpośrednie działanie wody. Dlatego materiał dobierany na te elementy powinien być materiałem odpornym na działanie korozyjne wilgoci. Urządzenie powinno być sztywno połączone z konstrukcją nośną zgrzewarki w celu zapewnienia współosiowości. Urządzenie powinno być także wyposażone w system zapewniający stały tor, stabilność i granice dla ruchu butelek.

**Wymagania ekonomiczne:** maszyna powinna być wykonana z materiałów możliwie najtańszych i łatwo dostępnych, wybranych spośród tych, które spełniają stawiane im wymagania konstrukcyjne i technologiczne. Konstrukcja powinna się cechować niskim kosztem wykonania oraz montażu. Maszyna powinna być tania w eksploatacji i oszczędna w zużyciu energii.

## 3. KONCEPCJE ROZWIĄZANIA PROBLEMU I WYBÓR NAJLEPSZEGO WARIANTU

### 3.1 Warianty rozwiązań technicznych

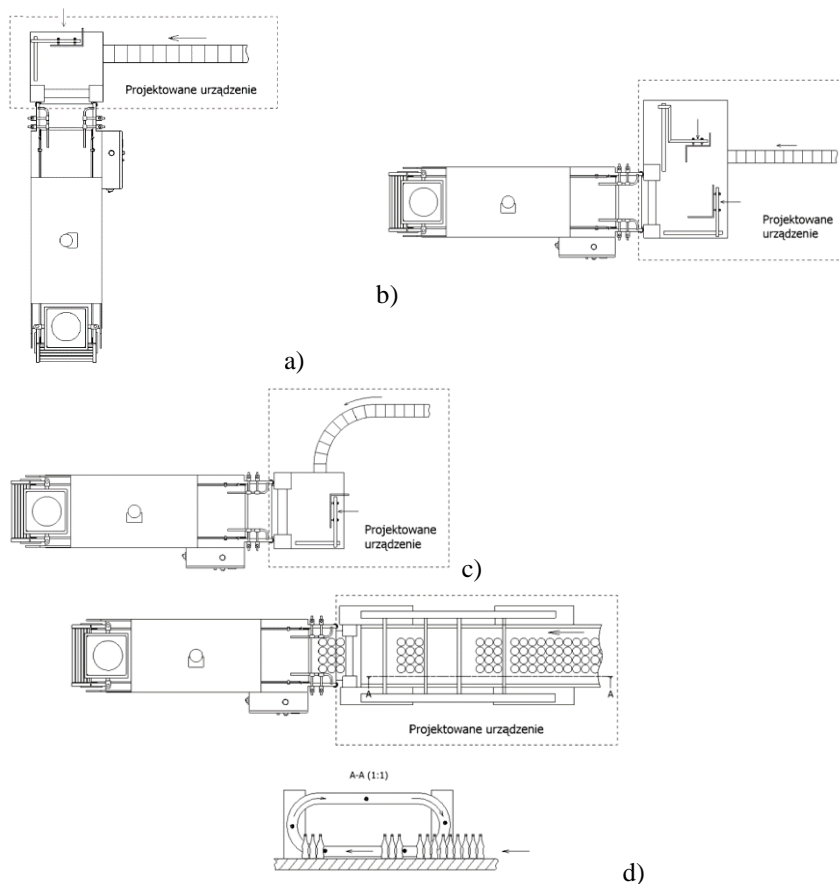
Układ transportowy może być zrealizowany z różnym najazdem do zgrzewarki pakującej. Automat pakujący z prostopadłym najazdem butelek: urządzenie składa się z napędu elektrycznego i napędu pneumatycznego, krótkiego transportera, stołu, na którym odbywa się układanie butelek w pakiety, mechanizmu układającego towar i przekazującego go do kolejnej strefy pakowania, systemu sterującego, konstrukcji nośnej, korpusu oraz systemu prowadnic zabezpieczających butelki przed przewróceniem (Rys. 3a). Urządzenie napędzane jest elektrycznie oraz pneumatycznie i sterowane elektrycznie za pośrednictwem czujników ruchu i elektrozaworów. Maszyna pakująca jest ustawiona pod kątem 90° względem linii produkcyjnej. Przekazywanie butelek przez transporter w strefę układania odbywa się natomiast równoległe do linii. Butelki mogą być zadawane jedno- lub wielo-

rzędowo. Układanie towaru odbywa się dwu- lub trzyetapowo w zależności od ilości rzędów na transporterze. Ostatni etap układania zawsze jest połączony z operacją podawania gotowego pakietu w strefę owijania w folię termokurczliwą.

Automat pakujący z równoległym najazdem butelek: maszyna zbudowana jest z następujących zespołów: napędu elektrycznego i napędu pneumatycznego, krótkiego transportera, mechanizmu układającego i przekazującego towar w kierunku prostopadłym do linii produkcyjnej, stołu, mechanizmu przekazującego pakiet w kierunku równoległym do linii produkcyjnej, systemu sterującego, konstrukcji nośnej, korpusu oraz systemu V prowadnic (Rys. 3b). Maszyna wyposażona jest w napęd elektryczny oraz pneumatyczny. Ustawienie maszyny oraz zadawanie butelek przez transporter w strefę układania jest równoległe do linii produkcyjnej. W zależności od potrzeb butelki mogą być podawane na maszynę jedno- lub wielorzędowo. Układanie produktów przebiega prostopadle do linii produkcyjnej i w zależności od ilości rzędów na transporterze może odbywać się dwu- lub trzyetapowo. Podczas ostatniego etapu układania pakiet dwunastu butelek podawany jest w strefę owijania w folię. Operacja podawania butelek realizowana jest dwuetapowo, gdzie w drugim etapie następuje kolejna zmiana kierunku na równoległy do linii produkcyjnej.

Automat pakujący z najazdem butelek realizowanym po łuku: składnikami maszyny są: napęd elektryczny i napęd pneumatyczny, krótki transporter zakręcający po łuku pod kątem prostym, stół, na którym odbywa się układanie butelek w pakiety, mechanizm układający towar i przekazujący go do kolejnej strefy pakowania, system sterujący, konstrukcja nośna, korpus oraz system prowadnic zabezpieczający butelki przed przewróceniem (Rys. 3c). Urządzenie korzysta z napędu elektrycznego oraz pneumatycznego, a jego sterowanie jest sterowaniem elektrycznym przy użyciu czujników ruchu i elektrozaworów. Tor ruchu butelek w końcowym odcinku transportera można zdefiniować jako łuk. Dzięki takiemu rozwiązaniu butelki w sposób płynny i bez pośrednictwa dodatkowych mechanizmów przekazywane są w strefę układania pod kątem  $90^\circ$ , pomimo iż maszyna pakująca jest ustawiona równoległe do linii produkcyjnej. Transporter może wprowadzać butelki na maszynę jedno- lub wielorzędowo. Wówczas rozpoczyna się proces układania towaru, który przebiega dwu- lub trzyetapowo. Ostatnim etapem układania jest operacja transportowania pakietu w strefę owijania w folię termokurczliwą.

Automat pakujący z doczołowym najazdem butelek: urządzenie składa się z napędu elektrycznego i napędu pneumatycznego, długiego transportera, mechanizmu układającego towar w pakiety i przekazującego go do kolejnej strefy pakowania, systemu sterującego, konstrukcji nośnej, korpusu oraz systemu prowadnic zabezpieczających butelki przed przewróceniem (Rys. 3d). Urządzenie napędzane jest elektrycznie oraz pneumatycznie i sterowane elektrycznie za pośrednictwem czujników ruchu i elektrozaworów. Butelki przekazywane są przez transporter w strefę układania od czoła maszyny pakującej. Transporter zadaje butelki od razu w ilości rzędów przewidzianych w pakiecie. Układanie towaru odbywa się w sposób niewstrzymujący ruchu butelek na transporterze. Specjalny mechanizm dzieli rzędy butelek na gotowe pakiety i ruchem ciągłym przekazuje towar w strefę owijania w folię termokurczliwą.



Rys. 3. Warianty rozwiązań technicznych linii transportowej z najazdem butelek: a) prostopadły, b) równoległy, c) po łuku, d) czołowy

### 3.2 Wybór koncepcji urządzenia metodą ważenia kryteriów

Do oceny i wyboru właściwej koncepcji automatu pakującego butelki PET wybieram metodę ważenia kryteriów. Podczas oceny koncepcji opieramy się jedynie na metodach szacunkowych, ponieważ bardziej szczegółowa ocena wymaga odpowiednio wyższego stopnia zaawansowania prac projektowych i konstrukcyjnych.

Tok postępowania w tej metodzie jest następujący [3]: dobiera się kryteria oceny, przeprowadza się „ważenie” kryteriów, przeprowadza się „ważenie” koncepcji (pomysłów) względem koncepcji, wyznacza się sumaryczny wskaźnik pomysłu i na tej podstawie dokonuje się wyboru jednego z nich. Ważenie kryteriów odbywa się na zasadzie porównywania każdego z nich z każdym i decydowania, które z obydwu jest ważniejsze. Kryterium

ocenione wyżej dostaje jeden punkt, a drugie kryterium (mniej ważne) zero punktów. Następnie sumuje się decyzje pozytywne dla każdego z kryteriów ( $s=7$ ) i wyznacza wskaźnik wagi kryterium  $s/D_T$ . Liczbę decyzji oblicza się ze wzoru (1).

$$D_T = \frac{n(n-1)}{2}, \quad (1)$$

gdzie:  $n$  – liczba porównanych elementów (kryteriów, pomysłów lub cech).

W taki sam sposób dokonuje się ważenia koncepcji z tym, że dokonuje się tego względem każdego kryterium oddzielnie. Ostatnim działaniem w metodzie ważenia kryteriów jest wyznaczanie sumarycznych wskaźników wagi koncepcji. Wyznacza się następnie ogólny wskaźnik wagi koncepcji jako iloczyn wskaźnika wagi kryterium i rozpatrywanego wskaźnika wagi koncepcji. Następnie sumuje się je, uzyskując sumaryczny wskaźnik wagi koncepcji jako ostateczne kryterium wyboru. Sugerując się warunkami pracy oraz zadaniami stawianymi przed urządzeniem dobrano następujące kryteria oceny koncepcji jak przedstawiono w Tabeli 1a dla 4 koncepcji rozwiązania technicznego (Tabela 1b). W tabeli 2 porównano ze sobą wszystkie kryteria na zasadzie „każde z każdym” przypisując odpowiednio porównywanym parom punkty 1 lub 0. Następnie zsumowano pozytywne decyzje dla każdego z kryteriów i wyznaczono wskaźnik wagi  $s/D_T$ .

Tab.1. Kryteria oceny (a) oraz koncepcje (b)

Lp.	Kryteria
1	Koszty wykonania
2	Koszty eksploatacji
3	Adaptacyjność względem systemu
4	Wymiary zewnętrzne
5	Masa
6	Prosta budowa
7	Funkcjonalność

a)

Lp.	Koncepcje
1	Prostopadły najazd butelek
2	Równoległy najazd butelek
3	Najazd butelek po łuku
4	Doczołowy najazd butelek

b)

Tab.2. Wskaźniki wag dla przyjętych kryteriów

Kryterium	Decyzje																					Suma decyzji pozytywnych $s$	Wskaźnik wagi $s/D_T$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
Koszty wykonania	0	0	1	1	1	0																3	0,143
Koszty eksploatacji	1						0	1	1	1	0											4	0,19
Adaptacyjność względem systemu		1					1					1	1	1	0							5	0,238
Wymiary zewnętrzne			0					0				0				1	1	0				2	0,095
Masa				0				0				0			0			0	0			0	0
Prosta budowa					0				0				0			0		1	1	0		1	0,048
Funkcjonalność						1				1			1			1	1	1	1			6	0,286
																						21	1



Po porównaniu ze sobą wszystkich kryteriów i wyliczeniu wskaźników wagi  $s/D_T$  wyraźnie widać, że kryterium „Masa” nie będzie miało wpływu na kolejne wyniki szacowania wagi koncepcji. Można więc to kryterium pominąć w dalszych obliczeniach.

W analogiczny sposób, jak przy ważeniu kryteriów, porównano koncepcje dla każdego kryterium z osobna i wyznaczono wskaźnik wagi  $s/D_T$  (Tab. 3).

Tab.3. Ocena wskaźnikowa koncepcji

Kryterium i koncepcje	Decyzje						Suma decyzji pozytywnych $s$	Wskaźnik wagi $s/D_T$
	1	2	3	4	5	6		
<b>Koszty wykonania</b>								
prostopady najazd butelek	1	1	1				3	0,5
równoległy najazd butelek	0			0	1		1	0,167
najazd butelek po łuku		0		1		1	2	0,333
doczłotowy najazd butelek			0		0	0	0	0
<b>Koszty eksploatacji</b>								
prostopady najazd butelek	1	1	1				3	0,5
równoległy najazd butelek	0			0	1		1	0,167
najazd butelek po łuku		0		1		1	2	0,333
doczłotowy najazd butelek			0		0	0	0	0
<b>Adaptacyjność względem systemu</b>								
prostopady najazd butelek	0	0	1				1	0,167
równoległy najazd butelek	1			1	1		3	0,5
najazd butelek po łuku		1		0		1	2	0,333
doczłotowy najazd butelek			0		0	0	0	0
<b>Wymiary zewnętrzne</b>								
prostopady najazd butelek	1	1	1				3	0,5
równoległy najazd butelek	0			0	1		1	0,167
najazd butelek po łuku		0		1		1	2	0,333
doczłotowy najazd butelek			0		0	0	0	0
<b>Prosta budowa</b>								
prostopady najazd butelek	1	1	1				3	0,5
równoległy najazd butelek	0			0	1		1	0,167
najazd butelek po łuku		0		1		1	2	0,333
doczłotowy najazd butelek			0		0	0	0	0
<b>Funkcjonalność</b>								
prostopady najazd butelek	0	0	1				1	0,167
równoległy najazd butelek	1			0	1		2	0,333
najazd butelek po łuku		1		1		1	3	0,5
doczłotowy najazd butelek			0		0	0	0	0

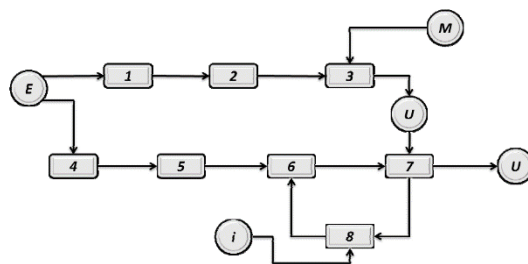
Tab.4. Sumaryczne wskaźniki wagi koncepcji

Kryterium	Koncepcje							
	prostopady najazd butelek		równoległy najazd butelek		najazd butelek po łuku		doczłotowy najazd butelek	
a	B	c = ab	b	c	b	c	b	c
Koszty wykonania <b>0,143</b>	0,5	0,072	0,167	0,024	0,333	0,048	0	0
Koszty eksploatacji <b>0,19</b>	0,5	0,095	0,167	0,032	0,333	0,063	0	0
Adaptacyjność względem systemu <b>0,238</b>	0,167	0,04	0,5	0,119	0,333	0,079	0	0
Wymiary zewnętrzne <b>0,095</b>	0,5	0,048	0,167	0,016	0,333	0,032	0	0
Prosta budowa <b>0,048</b>	0,5	0,024	0,167	0,008	0,333	0,016	0	0
Funkcjonalność <b>0,286</b>	0,167	0,048	0,333	0,095	0,5	0,143	0	0
<b>Sumaryczne wskaźniki wagi koncepcji</b>	x	<b>0,327</b>	x	<b>0,294</b>	x	<b>0,381</b>	x	0

Ostatnim krokiem w procesie oceniania koncepcji jest wyznaczenie sumarycznych wskaźników wagi koncepcji. W Tab. 4 w kolumnie „a” przedstawiono wskaźniki wagi kryteriów, a w kolumnie „b” wskaźniki wagi koncepcji. W kolumnie „c” znajdują się ogólne wskaźniki wagi koncepcji jako iloczyn a i b. Sumy wartości w kolumnie c dają sumaryczne wskaźniki wagi koncepcji. Koncepcją, która uzyskała najwyższą wartość sumarycznego wskaźnika wagi jest układ transportowy z automatycznym przygotowaniem pakietów po 12 szt. butelek zrealizowany na linii transportowej po łuku.

#### 4. UOGÓLNIONY SCHEMAT URZĄDZENIA I PROPOZYCJA REALIZACJI

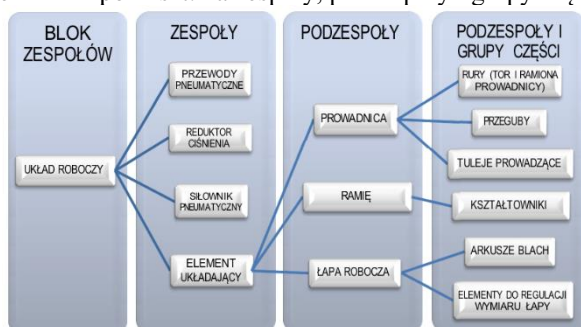
Projekt wstępny zautomatyzowanego urządzenia transportowego obejmuje opracowanie ogólnego rozwiązania problemu (schemat blokowy urządzenia), określenie relacji w systemie technicznym, podział urządzenia na bloki, zespoły i podzespoły, opracowanie schematów szczegółowych poszczególnych bloków, przeprowadzenie obliczeń konstrukcyjnych, kinematycznych i dynamicznych oraz opracowanie wytycznych do projektowania szczegółowego. W celu opracowania konstrukcji projektowanej maszyny przedstawiono jej układ przestrzenny i strukturę w sposób graficzny za pomocą modelu blokowego (Rys. 4). Oznaczenia na schemacie blokowym to: E-energia, M-masa, i-informacja, U-skutek użyteczny, 1-silnik elektryczny, 2-przekładnia, 3-transporter taśmowy, 4-sprężarka, 5-reduktor ciśnienia, 6-siłownik pneumatyczny, 7-układ roboczy, 8-układ sterowania. Układ zautomatyzowanej linii transportowej składa się z ośmiu głównych elementów. Elementy 1, 2, 3, 4, 5, 8 to elementy o relacjach przekształceń stałych, zaś elementy 6 i 7 to elementy o relacjach przekształceń uwarunkowanych. Oddziaływanie zwrotne elementu 7 na 6 jest sprzężeniem zwrotnym układu sterowania odpowiadającego za pracę maszyny.



Rys. 4. Schemat blokowy zautomatyzowanej linii transportowej

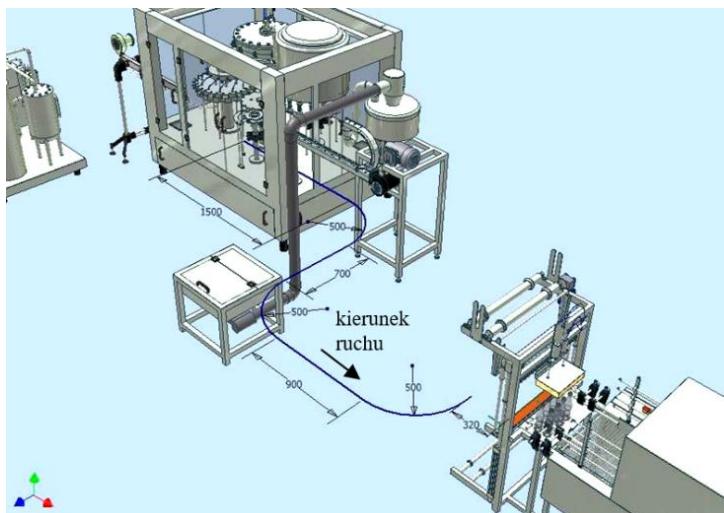
Pierwszym z czterech bloków urządzenia jest transporter i zostanie on dobrany w całości jako osobne urządzenie. Transportery, a ściślej mówiąc przenośniki do transportu wewnętrznego, są oferowane przez wielu producentów specjalizujących się w wytwarzaniu tego typu urządzeń. W większości ofert można znaleźć szeroki asortyment transporterów produkowanych masowo, spełniających nawet najbardziej wyszukane założenia funkcjonalne. Z tego powodu nie ma uzasadnienia ekonomicznego ani technicznego, by projektować takie urządzenie od podstaw. Kolejnym blokiem urządzenia jest układ roboczy, który będzie wykonywał pracę układania i przemieszczania napełnionych wodą butelek

PET. Urządzenie to musi być zaprojektowane zgodnie z przestrzenią roboczą maszyny pakującej oraz spełniać wszystkie pozostałe postawione mu założenia funkcjonalne, konstrukcyjne, wymiarowe i ekonomiczne. Jest to tak zwany projekt pod zamówienie, który należy zrealizować kojarząc ze sobą pewne gotowe podzespoły lub projektując, niektóre z nich od podstaw. Na Rys.5 przedstawiono podział bloku układu roboczego-pakującego butelki PET po 12szt. na zespoły, podzespoły i grupy części.



Rys. 5. Podział układu roboczego pakowania na zespoły, podzespoły i grupy części

Przenośnik do transportowania pełnych butelek PET z tribloka do maszyny zgrzewającej pakiety butelek składać będzie z trzech odcinków liniowych i trzech łuków o wymiarach przedstawionych na schemacie (Rys.6). Wysokość transportera powinna być równa wysokości stołu strefy sortowania, czyli wynosić 86cm.



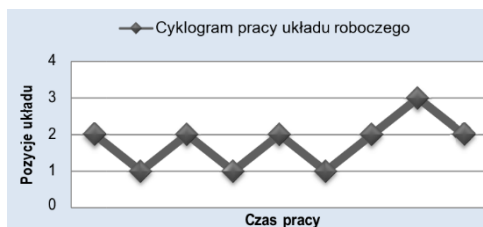
Rys. 6. Przestrzeń projektowa wybranego do realizacji układu transportowego pomiędzy triblokiem, a zespołem zgrzewającym w folii pakiety butelek

## 5. ANALIZA AUTOMATYCZNEGO UKŁADU PAKOWANIA

### 5.1 Układ roboczy i układ sterowania

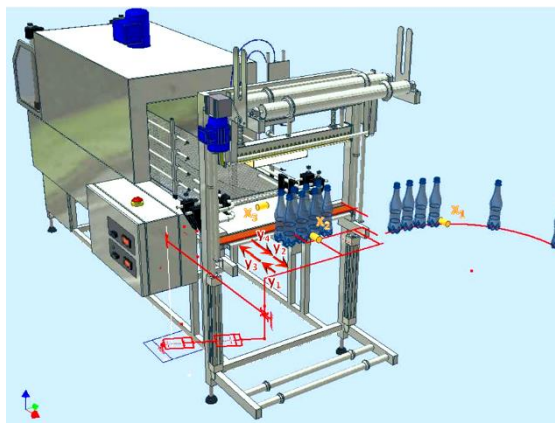
Najważniejszym zespołem układu roboczego jest siłownik pneumatyczny, który należy wnikliwie, przeanalizować i po dokonaniu odpowiednich obliczeń dobrać z katalogów firm oferujących tego typu urządzenia. Na podstawie tych samych obliczeń dobiera się zawór redukujący, sterujący wartością ciśnienia roboczego podawanego do siłownika oraz średnicę i długości przewodów pneumatycznych. Sortownik jest zespołem, który należy zaprojektować, kojarząc ze sobą podzespoły i grupy, części. Blokiem odpowiadającym za automatyczną pracę układu roboczego pracującego zgodnie z cyklogramem jak pokazano na Rys.7, jest układ sterowania. Projekt wstępny tego bloku ogranicza się do sporządzenia schematów logicznych przedstawienia rodzajów przedstawiających zasadę działania układu oraz elementów wykonujących dane zadania np. zaworów rozdzielających, czujników czy elementów przetwarzania informacji. Na podstawie takiego przedstawienia układu sterującego można dopiero dokonać projektu szczegółowego, czyli doboru gotowych elementów i ich umiejscowienia w przestrzeni projektowej.

Ramię układu roboczego napędzane dwoma siłownikami pneumatycznymi jest zdolne wykonać cztery ruchy liniowe  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$ , w których efekcie może zająć trzy pozycje krańcowe 1, 2, 3 (Rys.7). Rys. 8 przedstawia pozycje czujników zbierających informacje z obszaru pracy układu sortująco-pakującego ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ). Model i schemat wraz zakresem ruchów  $y$  oraz pozycjami czujników opracowano w programie Inventor. Układ zaczyna swoją pracę od pozycji nr 2. W tym czasie transporter przemieszcza butelki z wodą, które zbierają się na jego końcu (strefa przed zgrzewarką). Jeśli znajdują się tam cztery butelki, czujnik optyczny  $x_1$  odbierze długi sygnał, a ramię wykona ruch  $y_2$  i zajmie pozycję nr 1, tym samym umożliwiając butelkom wjazd do strefy sortowania. Gdy pierwsza butelka znajdzie się w polu widzenia czujki  $x_2$ , ramię przesunie się z powrotem do pozycji nr 2 (ruch  $y_1$ ) zabierając ze sobą rząd czterech butelek. Układ roboczy po spełnieniu tych samych warunków wykonuje cyklicznie ruchy  $y_2$  i  $y_1$ . Każde przemieszczenie rzędu butelek powoduje wypchnięcie poprzedniego rzędu nieco dalej (o odległość równą średnicy butelki). Po wykonaniu przez ramię ruchu  $y_1$  trzy razy, pierwszy rząd butelek wypchnięty dwukrotnie przez poprzednie rzędy znajdzie się w polu widzenia czujnika  $x_3$ . Wtedy ramię wykona ruch  $y_3$  i przetransportuje trzy rzędy butelek do pozycji nr 3. Po wykonaniu pracy układ natychmiast wykonuje ruch  $y_4$  powracając do pozycji startowej. Wymieniony proces powtarza się cyklicznie, dopóki spełnione są wszystkie jego warunki lub nie zostanie przerwany ręcznie.



Rys. 7. Cyklogram pracy układu segregującego-pakującego

Projektowany układ sterowania jest układem sekwencyjnym z pamięcią. Na sygnały wyjściowe w danej chwili czasu mają wpływ nie tylko wartości sygnałów wejściowych (0 lub 1), ale i sygnały wyjściowe, które pojawiły się w poprzedzających chwilach czasowych. Opis cyklu pracy układu roboczego w zależności od sygnałów powinien wyglądać następująco: Układ roboczy znajduje się w pozycji nr 2, gdy:  $y_4=1$  i  $y_1=1$  oraz gdy  $y_4=1$  i  $y_1=1$  i  $x_1=1$ , to  $y_2=1$  i  $y_1=0$  (poz. nr1), oraz gdy  $y_4=1$  i  $y_2=1$  i  $x_2=1$ , to  $y_1=1$  i  $y_2=0$  (poz. nr2), a następnie dla:  $y_4=1$  i  $y_1=1$  i  $x_3=1$ , to  $y_4=0$  i  $y_3=1$  i  $y_1=1$  (poz. nr3) i dla ostatniej sekwencji dla  $x_3=0$  i  $y_3=1$ , to  $y_3=0$  i  $y_4=1$  i  $y_1=1$  (poz.2 startowa) i tu następuje koniec pełnego cyklu.



Rys. 8. Pozycje czujników ( $x_1-x_3$ ) oraz ruch elementów roboczych ( $y_1-y_4$ ), wykonano w programie Inventor.

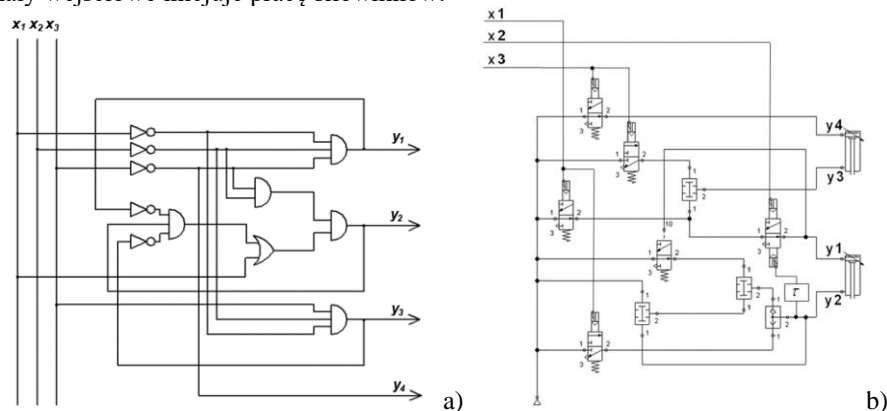
## 5.2 Czasowe cykle pracy i schematy układu sekwencyjno-logicznego

Na podstawie powyższego opisu oraz dodatkowych obliczeń kinematycznych i czasów pracy opracowano tabelę z taktami pracy i czasami (Tab.5) przedstawiający stany sygnałów w tzw. taktach układu sterowania [5,6].

Tab.5. Takty pracy i czasy pracy układu roboczego

Takty	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x <sub>1</sub>	1	-	+	-						
x <sub>2</sub>	2	-			+		-			
x <sub>3</sub>	4	-					+		-	
y <sub>1</sub>	8	+		-		+				
y <sub>2</sub>	16	-		+						
y <sub>3</sub>	32	-						+		-
y <sub>4</sub>	64	+							-	+
Stopień łączenia	72	73	81	80	82	74	72			
							76	44	40	72

Wykres czasowy jest równoznaczny z tabelą stanów i może ją w pełni zastępować. Na jego podstawie można wyznaczyć tablice Karnaugh służące do minimalizacji funkcji logicznych wszystkich zmiennych wyjściowych [5,6]. Korzystając z wyznaczonych i zminimalizowanych równań wyznaczono schemat układu sekwencyjnego (Rys.9a), który opierać się będzie wyłącznie na elementach logicznych I, LUB, NIE. Pamięć układu istnieje dzięki zastosowaniu pętli sprzężeń zwrotnych pochodzących z sygnałów wyjściowych. Schemat funkcjonalny (Rys.9b) nie jest w pełni odwzorowaniem układu logicznego, ponieważ występują w nim sygnały elektryczne, które muszą być zamienione na sygnały pneumatyczne, co wymusza na projektancie zastosowanie dodatkowych zaworów dwudrogowych normalnie zamkniętych. Dodatkowo, chcąc uniknąć zastosowania zaworów trzydrogowych, schemat został poddany kolejnej minimalizacji, w której efekcie zostały użyte wprowadzony również zawory maksymalnie dwudrogowe. Do układu został wprowadzony element opóźniający sygnał zwrotny y<sub>2</sub>. W programie Festo Fluidsim wykonano dodatkową minimalizację elementów układu, gdyż istnieje w nim możliwość przeprowadzania animacji pracy układu sterowania. Układ w odpowiedzi na konkretne sygnały wejściowe inicjuje pracę siłowników.



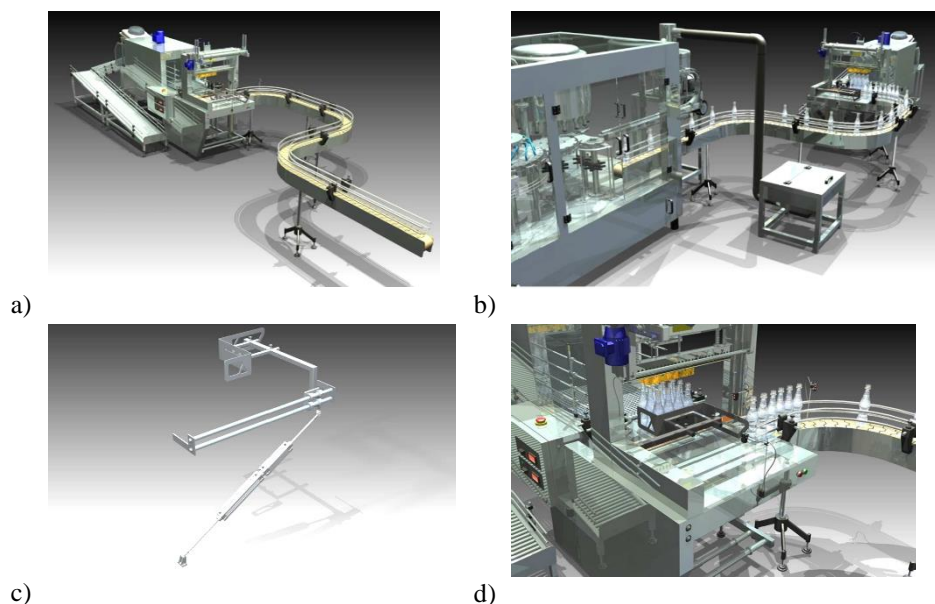
Rys. 9. Schematy: logiczny układu sekwencyjnego (a), funkcjonalny (b)

Schemat funkcjonalny nie jest w pełni odwzorowaniem układu logicznego, ponieważ występują w nim sygnały elektryczne, które muszą być zamienione na sygnały pneumatyczne, co wymusza na projektancie zastosowanie dodatkowych zaworów dwudrogowych

normalnie zamkniętych. Dodatkowo, chcąc uniknąć zastosowania zaworów trzydrogowych, schemat został poddany kolejnej minimalizacji, w której efekcie zostały użyte wprowadzony również zawory maksymalnie dwudrogowe. Do układu został wprowadzony element opóźniający sygnał zwrotny y2. W programie FESTO FluidSIM wykonano dodatkową minimalizację elementów układu, gdyż istnieje w nim możliwość przeprowadzania animacji pracy układu sterowania. Układ w odpowiedzi na konkretne sygnały wejściowe inicjuje pracę siłowników.

## 6. ŚRODKI TECHNICZNE ZAUTOMATYZOWANEJ LINII

Zgodnie z założeniami projektowymi oraz z wynikami projektu wstępnego dobrano z katalogu firmy AMSORT przenośnik płytkowy typu NT-300-15 [7]. Poniżej przedstawiono główne cechy przenośnika: przenośnik łańcuchowy z łańcuchem płytkowym o szerokości 114,3mm, napędzany silnikiem elektrycznym z motoreduktorem, prowadnice ślizgowe łańcucha wykonane są z tworzywa sztucznego PET, łańcuch płytkowy ze stali kwasoodpornej, zespół naciągowy. W celu wyznaczenia butelkom toru ruchu i zabezpieczenia przed wywróceniem dobrano z katalogu typ prowadnicy oznaczony numerem 04 [7]. Jako materiał łańcucha płytkowego wybrano stal kwasoodporną (materiał odporny na korozję w warunkach wilgotnych. Prędkość liniowa transportera zgodnie z obliczeniami projektu wstępnego wynosi  $v=0,25\text{m/s}$ , czyli zgodnie z danymi technicznymi przenośnika płytkowego NT-300-185. Zgodnie z założeniami i obliczeniami projektowymi dobrano z katalogu firmy FESTO dwa siłowniki znormalizowane: DNC- KP [8] o średnicy tłoków  $D=32\text{mm}$ . Dobre siłowniki połączone ze sobą szeregowo w sposób taki, aby ich kierunki wysuwania tłoczków były sobie przeciwne. Dobrano zawory rozdzielające firmy FESTO: dwa zawory dwudrogowe, dwupołożeniowe, sterowane elektrycznie, normalnie zamknięte oraz dwa normalnie otwarte (negacji), trzy pneumatyczne zawory logiczne koniunkcji, jeden logiczny alternatywy, jeden zawór dwudrogowy, dwupołożeniowy sterowany pneumatycznie, normalnie otwarty (negacji) oraz jeden zawór dwudrogowy, dwupołożeniowy sterowany dwustronnie elektrycznie i pneumatycznie, dodatkowo zawór z blokadą położeń. Zgodnie z założeniami projektu wstępnego dobrano trzy czujniki optoelektroniczne, odbiciowe SOEG-RT, FESTO [9]. Model 3D linii rozlewni wody wraz z linią transportową i oraz zautomatyzowany zespół pakujący butelki w pakiety przedstawiono na Rys.10a,b. Przesunięcie gotowego pakietu butelek przez układ roboczy (Rys.10c) w kolejną strefę pakowania po wykryciu trzeciego rzędu butelek przez czujnik po prawej stronie stołu zamieszczono na Rys.10d.



Rys. 10. Linia transportowa z automatyzowaną sekcją segregująco-pakującą (a) i (b), układ roboczy z silownikiem (c), sekcja segregująco-pakująca (d)

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodykę i główne etapy realizacji projektu zautomatyzowanej linii transportowej z sekcją segregująco-pakującą. Na podstawie analizy problemu oraz przeanalizowaniu aspektów funkcjonalnych, ekonomicznych i technicznych ustalono wymagania techniczne dla urządzenia transportowego oraz sekcji pakującej. Z myślą o zrealizowaniu projektu spełniającego wymagania techniczne w stopniu co najmniej dobrym, przedstawiono w pracy cztery różne koncepcje automatu pakującego. Następnie dokonano wyboru jednej z koncepcji metodą ważenia kryteriów. Proces projektowania urządzenia został podzielony na dwa etapy: projekt wstępny oraz projekt szczegółowy. W projekcie wstępnym przedstawiono graficzny zapis struktury urządzenia oraz podzielono je na bloki. Na podstawie projektu wstępnego sporządzono projekt szczegółowy, w którego zakres weszły obliczenia projektowe, dobór gotowych elementów, modele 3D części i ich zespołów. Na podstawie wykonanych obliczeń opracowano: cyklogram pracy zautomatyzowanej sekcji pakującej, schemat logiczny i funkcjonalny układu sterującego oraz układ roboczy. Sekcja pakująca jest zintegrowana z dobranym przenośnikiem płytkowym. Na tej podstawie dobrano wszystkie środki techniczne układu sterującego: silowniki, czujniki, zawory, etc. Przeprowadzono symulacje pracy układu roboczego wykonane w programie Autodesk Inventor 2009 oraz symulacje pracy układu sterowania wykonane w pro-



gramie Festo FluidSIM. Na zakończenie można stwierdzić, że urządzenie spełnia postawione mu wymagania. Zautomatyzowana linia technologiczna rozlewni wody wraz sekcją segregująco-pakującą nie tylko zapewnia automatyczną pracę procesu pakowania butelek PET, ale również automatyczną pracę całej linii technologicznej przy wydajności 4000szt./godz. Wiele mniejszych zakładów stosuje system półautomatyczny, czyli przy udziale pracy ludzkiej. Dane stanowisko pracy człowieka mieści się w środku ciągu maszyn automatycznych o wysokiej wydajności i powoduje, że ich zdolność produkcyjna nie jest w pełni wykorzystywana. Człowiek nie jest w stanie wykonywać danych zadań w tak szybkim tempie, do jakiego są zdolne pozostałe maszyny linii produkcyjnej. Szacuje się, że zastosowanie zaprojektowanego automatu pakującego wraz z przenośnikiem płytowym może zwiększyć wydajność całej linii nawet czterokrotnie.

## LITERATURA

**C. Lee, B. Song, Y. Park**, *Generation of new service concepts: A morphology analysis and genetic algorithm approach*, Expert Systems with Applications, 36 (2009) 12454–12460.

**J. Hao, Q. Zhao, Y. Yan**, *A function-based computational method for design concept evaluation*, Advanced Engineering Informatics, 32 (2017) 237–247.

**A. Dziama**, *Metodyka konstruowania maszyn*, Warszawa, PWN, 1985.

**B. Wasilewska, R. Knosala**, *Kreatywność zaawansowana jako warunek konieczny w procesach innowacji*, Zarządzanie Przedsiębiorstwem, 1 (2015).

**P. Larminat, Y. Thomas**, *Automatyka - układy liniowe. T. 1-3. Tłumaczenie: Z. Uhrynowski, S. Uhrynowski i M. Bereziński*, Warszawa, WNT, 1983.

**W. Szenajch**, *Napęd i sterowanie pneumatyczne*, Warszawa, WNT, 1997.

[http://www.amsort.pl/smarty/uploaded\\_images/224.pdf](http://www.amsort.pl/smarty/uploaded_images/224.pdf).

[http://xdki.festo.com/xdki/data/doc\\_PL/PDF/PL/SOEX\\_PL.PDF](http://xdki.festo.com/xdki/data/doc_PL/PDF/PL/SOEX_PL.PDF).

[http://xdki.festo.com/xdki/data/doc\\_PL/PDF/PL/DNC\\_PL.PDF](http://xdki.festo.com/xdki/data/doc_PL/PDF/PL/DNC_PL.PDF).

# **ANALIZA EFEKTYWNOŚCI KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ PRZY WYKORZYSTANIU SYSTEMU I-PACK NA PRZYKŁADZIE MAGAZYNU RZECZYWISTEGO PRZEDSIĘBIORSTWA**

## **1. WPROWADZENIE**

Zakupy przez Internet stały się nieodłącznym elementem codziennego funkcjonowania. Stąd, rozwój procesu sprzedaży stawia wiele wyzwań przed firmami z branży e-commerce. Aby zaspokoić potrzeby rynku, firmy szukają wielu rozwiązań usprawniających działalność przedsiębiorstwa, zaczynając od budowy sieci magazynów poprzez całkowite powierzenie swoich zleceń firmom zewnętrznym, posiadającym zaplecze do realizacji zamówień klientów.

Duża konkurencyjność wymusza na przedsiębiorstwach wprowadzanie rozwiązań technologicznych, które pozwalają zautomatyzować proces realizacji zamówień. Integracja systemów informatycznych usprawniających przepływ danych między poszczególnymi etapami realizacji zamówień, pozwala na szczegółowe monitorowanie procesu oraz wspiera podejmowanie decyzji przez pracowników. Aktualnie można zaobserwować coraz większe wykorzystanie automatyzacji oraz robotyzacji, która zastępuje rutynową i powtarzalną pracę ludzką. Wymienione rozwiązania przyczyniają się do osiągnięcia korzyści na wielu płaszczyznach pracy przedsiębiorstwa, tj. zwiększenie wydajności oraz redukcję kosztów pracy. Niniejszy artykuł ukazuje analizę efektywności realizacji zamówień przy wykorzystaniu automatycznej linii do przygotowywania i monitorowania podstawowych parametrów paczek z zamówieniami, o nazwie I-Pack. Maszyna jest produktem katalogowym, francuskiej firmy Sealed Air B+ Equipment (prod. 2022). System dostosowany pod indywidualne wymagania wdrożono w przedsiębiorstwie dystrybucyjnym w województwie lubuskim. W niniejszej pracy zbadano go pod względem niezawodności, wydajności oraz efektywności załadunku zrealizowanych zamówień względem tradycyjnej metody kompletacji zamówień.

## **2. PROCES KOMPLETACJI ZAMÓWIEŃ**

Kompletacja powoduje najwięcej problemów spośród wszystkich czterech głównych faz procesu magazynowania, w których skład zalicza się: przyjęcie towaru, magazynowanie, kompletację oraz wydanie. Kompletacja uważana jest za kluczową fazę w przedsiębior-

stwie, gdyż może stanowić nawet do 65% wszystkich kosztów eksploatacyjnych w magazynie. Względem jakości ważne, aby towar był skompletowany zgodnie z zamówionym asortymentem oraz wybraną ilością artykułów. Poprawne wykonanie tego procesu rzutuje na zadowolenie odbiorcy. Do głównych czynności procesu kompletacji należy 5 faz [1]: od przygotowanie jednostek ładunkowych dla potrzeb kompletacji zamówień, po transport do strefy wydań przesyłek. Wszystkie etapy przedstawia Rys. 1.



Rys.1. Fazy procesu kompletacji (opracowanie własne)

W przypadku kompletacji zleceń, etap komisjonowania zamówień można realizować na dwa sposoby: „towar do człowieka”, „człowiek do towaru”.

W przypadku komisjonowania zamówień sposobem „towar do człowieka”, produkty przechowywane są zazwyczaj w automatycznych magazynach. Następnie dostarczane przy pomocy skomputeryzowanych systemów do pracowników na stanowiskach kompletacyjnych. Pracownik pobiera z pojemnika odpowiednią ilość artykułów, po czym system odstawia pojemnik na przypisane mu miejsce magazynowania. Sposób ten, pozwala na ograniczenie operatorów, co zmniejsza prawdopodobieństwo popełnienia błędu, wypadku podczas poruszania się po magazynie oraz zwiększa wydajność i efektywność kompletacji [2].

Dla kompletacji „człowiek do towaru”, pracownik posiadający odpowiednie wyposażenie jak np. pojemniki kompletacyjne, wózki transportowe lub skanery przemierza cały magazyn posiadając listę towarów do pobrania. Na tej podstawie odczytuje lokalizację potrzebnego artykułu oraz ilości wymaganego asortymentu. Pomaga to uniknąć błędów podczas obierania artykułów. Kolejność pobierania asortymentu jest wyznaczana za pomocą najkrótszej drogi między lokalizacjami [1]. W magazynach stosuje się różne technologie kompletacji, które wymieniono i opisano poniżej.

A.1.Pick by light: to zasygnalizowanie osobie kompletującej zlecenie za pomocą lampki LED pozycji detalu na regale. Na monitorze pojawia się informacja o ilości potrzebnego do pobrania asortymentu. Przedmiotowa technologia najlepiej sprawdza się w magazynach ze stałym asortymentem [3].

A.2.Pick by voice: polega na wykorzystaniu technologii głosowej, gdzie pracownik jest wyposażony w system słuchawkowy oraz mikrofon. Zalecana jest przy kompletacji zamówień bardzo złożonych, w których skład wchodzi duża ilość drobnych artykułów. Pracownik dostaje listę towarów do pobrania, następnie jest prowadzony przez system do wskazanych lokalizacji, gdzie słyszy informację o wymaganej ilości produktu w zamówieniu. Pobranie potwierdza za pomocą cyfr kontrolnych, dzięki czemu system sprawdza poprawność operacji [3].

A.3.Pick by scan: pracownik kompletujący wyposażony jest w skaner, który jest połączony z system ERP lub WMS i pozwala na odczyt danych z kodów kreskowych. Zlecenia otrzymane z tych systemów wyświetlają się na ekranie skanera w postaci lokalizacji. Dodatkowo, pracownik posiada informacje w jakim pojemniku należy umieścić dane artykuły. Po potwierdzeniu na skanerze pobranego towaru przechodzi się do następnej lokalizacji [3].

A.4.Pick by frame: metoda opiera się na standardowym multi-kompletacyjnym wózku, do którego dokuje się samonośną ramę. Konstrukcja wyposażona jest w cyfrowe wyświetlacze sprzężone przez Wi-Fi z systemem ERP, jak np. SAP. Na ekranach wyświetlane są informacje odnośnie ilości, lokalizacji artykułu, informacji na jakim etapie jest dane zamówienie lub też o zakończeniu komisjonowania danego zlecenia. Dodatkowo, pracownik każde pobranie musi potwierdzić czytnikiem kodów kreskowym albo przyciskiem kwitującym [3].

A.5. Pick by vision: metoda jest bardzo zbliżona do pick by voice, jednakże nie używa się w niej generatora mowy. Pracownik posiada specjalistyczne okulary, które za pomocą rzeczywistości rozszerzonej informują o lokalizacji oraz ilości artykułów potrzebnych do zamówienia przez wygenerowaną komputerowo wizualizację. Pracownik może być dodatkowo wyposażony w mały skaner napalcowy i każde pobranie potwierdzać zeskanowaniem kodu kreskowego znajdującego się na artykule [3].

### 3. STUDIUM PRZYPADKU

W artykule wykonano analizę wybranych wskaźników dla zautomatyzowanego systemu I-Pack służącego do wsparcia logistyki magazynu. Maszyna jest produktem katalogowym, francuskiej firmy Sealed Air B+ Equipment (prod. 2022). Według producenta obsługuje do 900 paczek/h, niemniej ma na to wpływ rodzaj używanego kartonu, kleju i ustawienia.

Badana firma rozważa dalsze inwestycje w podobne rozwiązania, stąd istotne jest zweryfikowanie rzeczywistych parametrów pracy linii, w stosunku do obecnych, klasycznych metod. W związku z tym, zdecydowano się na zbadanie systemu I-Pack pod względem wydajności, efektywności załadunku gotowych zamówień oraz niezawodności, gdzie wstępnie zweryfikowano problem powstawania zatorów na linii.

### 3.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa

Badanym przedsiębiorstwem jest firma wchodząca w skład dużej międzynarodowej grupy inżynieryjno-logistycznej świadczącej kompleksowe usługi w zakresie inżynierii, logistyki produkcji, logistyki oraz organizacji sieci dystrybucji. Firma świadczy usługi dla klientów z branży motoryzacyjnej, spożywczej, a także mody i dóbr konsumpcyjnych.

Przedmiotowe przedsiębiorstwo zatrudnia obecnie ok. 400 pracowników, w tym specjalistów ds. logistyki magazynowej, specjalistów ds. kontroli jakości, planistów, operatorów wózków jezdniowych, techników utrzymania ruchu, kierowców, pracowników magazynowych. Magazyn aktualnie prowadzi usługę fulfillmentu dla głównego klienta z branży e-commerce. Usługa ta jest kompleksowym przejęciem obowiązków przez inną firmę z zakresu działań logistycznych lub też transportowych, co stanowi typ outsourcingu. Obowiązkami przejętymi są między innymi: magazynowanie towaru, kompletacja zamówień, wysyłka oraz obsługa wszystkich zwrotów lub reklamacji. System informatyczny dwóch firm jest zintegrowany za pomocą EDI (ang. Electronic Data Interchange), co umożliwia elektroniczną wymianę danych, takich jak dokumentacja, faktury czy dane zamówienia [4]. Magazyn aktualnie zajmuje powierzchnię około 44000 m<sup>2</sup> dzięki czemu jest w stanie pomieścić bardzo dużą ilość towaru i świadczyć usługi na dużą skalę. Przedsiębiorstwo dodatkowo używa programu WMS (ang. warehouse management system), który znacznie usprawnia proces realizacji zamówień. Pozwala on monitorować zapasy firmy czy też proces realizacji zamówień [4]. Przedsiębiorstwo stosuje metodę kompletacji hybrydową, w której skład wchodzi metoda cluster picking oraz zone picking. Cluster Picking pozwala pracownikom kompletacyjnym produktów z różnych zamówień jednocześnie sortując je do odpowiednich pojemników, natomiast zone picking jest metodą podziału magazynu na poszczególne strefy, co znacznie skraca czas kompletacji zamówień [6].

### 3.2. System I-Pack

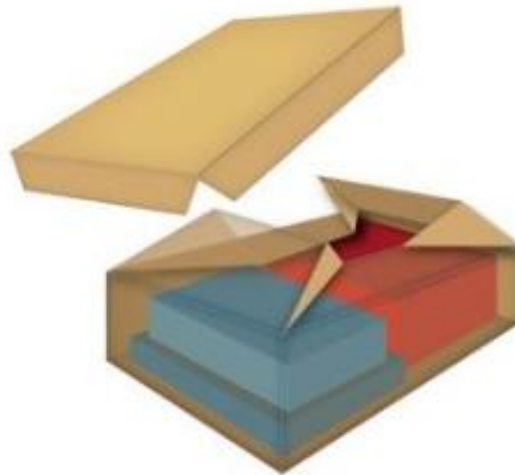
Przedsiębiorstwo w procesie kompletacji zamówień wykorzystuje innowacyjny system I-Pack, który został wdrożony w 2022 roku. Jest to urządzenie służące do zautomatyzowania procesu pakowania. Za jego pomocą można zredukować koszty poprzez ograniczenie ilości pracowników na etapie pakowania, większe wykorzystanie przestrzeni załadunkowej, zmniejszenie ilości rodzajów kartonów oraz brak konieczności zakupu folii wypełniającej. Paczki pochodzące z tego systemu są stabilniejsze od zamówień pakowanych ręcznie, co powoduje mniejszą ilość uszkodzeń przy układaniu paczek w przestrzeni załadunkowej.

Urządzenie I-Pack wymaga obsługi jednej osoby nadzorującej, uzupełniającej dekle oraz klej potrzebny do zaklejenia kartonów. Rys. 2 przedstawia zautomatyzowaną linię I-Pack.



*Rys. 2. Urządzenie automatycznego pakowania I-Pack [14]*

Kartony stosowane w tym systemie mają jednakową szerokość oraz długość, natomiast różnią się wysokością ze względu na wypełnienie pojemnika. Rys. 3 przedstawia schematyczny karton wykorzystywany w systemie I-Pack.



*Rys. 3. Karton wykorzystywany w systemie I-Pack wraz z prezentacją jego zamykania*

## 4. OCENA WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW SYSTEMU I-PACK

### 4.1. Analiza niezawodności

Dla analizy niezawodności zweryfikowano dane powiązane z zaobserwowanym problemem zatoru na linii I-Pack. Wyznaczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla ilości paczek z odnotowanym błędem wagi, a zacięciami linii I-Pack. Współczynnik policzono dla obydwu rodzajów zleceń, tj. dla zamówień pakowanych w zwykłe zbiorcze kartony (tzw. paczki zwykłe) oraz dla kartonów dedykowanych systemowi I-Pack. W Tab. 1. przedstawiono dane zebrane z 5-ciu tygodni.

Tab. 1. Ilość paczek z błędem wagi oraz paczek powodujących zacięcia się linii I-Pack

	paczki z błędem wagi (X)		zacięcia linii (Y)	
	zwykłe paczki	I-Pack	zwykłe paczki	I-Pack
tydzień 1	119	23	52	11
tydzień 2	223	31	27	4
tydzień 3	248	23	36	7
tydzień 4	441	48	55	13
tydzień 5	90	9	60	7
Suma	1121	134	230	42

Do obliczenia korelacji liniowej zostanie zastosowany wzór (1).

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{\sigma(x)\sigma(y)} \quad (1)$$

Jako zmienną objaśniającą  $x$  wskazano liczbę paczek występującą z błędem wagi, natomiast zmienna objaśniana  $y$  to ilość paczek, które powodowały zator na linii. Dodatkowo zostanie zbadana istotność współczynnika korelacji, która informuje czy w populacji generalnej zachodzi podobny związek do tego zaobserwowanego w populacji próby lub jest on tylko przypadkiem.

Badanie korelacji dla paczek dedykowanych systemowi I-Pack

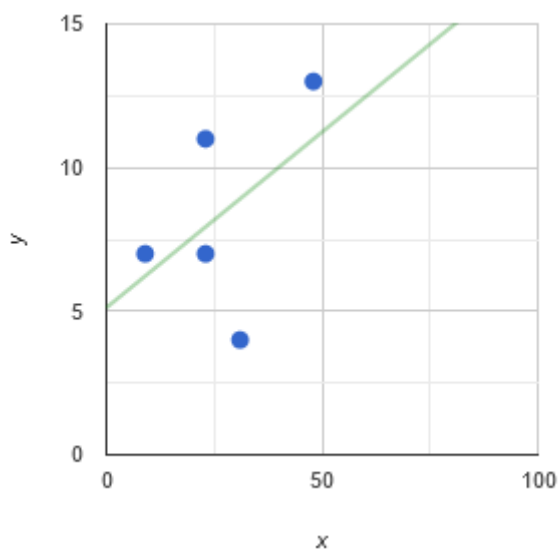
W pierwszej kolejności została wyliczona średnia arytmetyczna dla obydwu zmiennych:

$$x_{\text{sr}} = 26,8$$

$$y_{\text{sr}} = 8,4$$

Następnie została policzona kowariancja  $Cov(x,y)$ , która wynosi 19,88. Kolejnym krokiem było obliczenie iloczynu odchyłeń standardowych dla zmiennych  $x$  oraz  $y$ , który wynosi 40,8. Współczynnik korelacji  $r(x,y) = 0,487$ . Wynik ten oznacza średni związek między

paczkami blokującymi linie, a paczkami występującymi z błędem wagi. Na Rys. 4 przedstawiono diagram punktowy dla analizowanych zmiennych.



Rys. 4. Punktowy diagram korelacji dla systemu I-Pack

W kolejnym kroku została policzona istotność dla otrzymanego współczynnika korelacji. Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyznaczony wyżej współczynnik korelacji był równy  $r = 0,487$ , gdzie liczebność próby  $n = 5$ . Stopień swobody  $s=n-2$ , jest równy 3.

Wartość krytyczna rozkład t-studenta wynosi 3,1824.

Obszar krytyczny ma postać:  $(-\infty; -3.182 > U < 3.182; +\infty)$ .

Wymienione są dwie hipotezy:

$H_0: \rho=0$  - korelacja jest statystycznie nieistotna, ponieważ jej współczynnik jest nieistotny statystycznie.

$H_1: \rho \neq 0$  - korelacja jest statystycznie istotna, ponieważ jej współczynnik jest istotny statystycznie.

Otrzymane dane zostały podstawione do wzoru na statystykę testową (2).

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \times \sqrt{n-2} \quad (2)$$

Statystyka zerowa równa  $t = 0,9657$  nie należy do obszaru krytycznego. Odrzucona więc będzie hipotezę alternatywną na rzecz hipotezy zerowej – korelacja jest nieistotna. Wynik świadczy o braku wpływu paczek z błędem wagi na powstawanie zatorów.



### Badanie korelacji dla paczek zwykłych (pakowanych ręcznie)

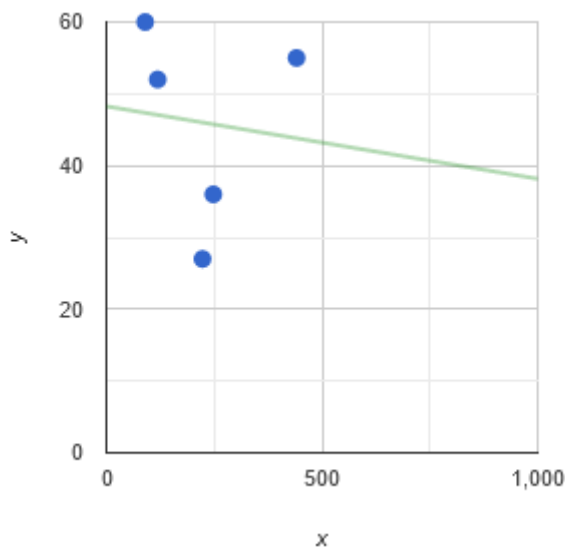
Zostało przeprowadzone badanie związku ilości paczek występujących z błędem wagi ( $x$ ) z liczbą zacięć linii ( $y$ ) przez paczki w przypadku kartonów pakowanych ręcznie.

W pierwszym kroku liczona jest średnia arytmetyczną dla zmiennych:

$$\begin{aligned}x_{\text{sr}} &= 224,2 \\ y_{\text{sr}} &= 46\end{aligned}$$

Następnie została policzona kowariancja  $\text{Cov}(x,y) = -154,8$ . Kolejnym krok to wyznaczenie iloczynu odchyłeń standardowych dla zmiennych  $x$  oraz  $y$ , który wyniósł 1540,20.

Współczynnik korelacji  $r(x,y)$  to  $-0,100$ . Wynik ten oznacza brak związku między zacięciami linii, a paczkami występującymi z błędem wagi. Rys.5 przedstawia graficzną interpretację korelacji.



Rys.5. Punktowy diagram korelacji dla paczek zwykłych

W kolejnym kroku zostanie policzona istotność otrzymanego współczynnika korelacji. Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$  przy korelacji  $r = -0,100$ . Liczebność próby  $n = 5$ .

Stopień swobody opisany jako  $s=n-2$ , jest równy 3. Wartość krytyczna rozkładu t-studenta wynosi 3,1824.

Obszar krytyczny ma postać:  $(-\infty; -3.182 > U < 3.182; +\infty)$ .

Wymieniono dwie hipotezy:

$H_0: \rho=0$  - korelacja jest statystycznie nieistotna, ponieważ jej współczynnik jest nieistotny statystycznie.

$H_1: \rho \neq 0$  - korelacja jest statystycznie istotna, ponieważ jej współczynnik jest istotny statystycznie.

Zgodnie ze wzorem (2) wyznaczono  $t = 0,1723$ . Statystyka zerowa równa  $t = 0,1723$  nie należy do obszaru krytycznego. Hipoteza alternatywna zostaje odrzucona na rzecz hipotezy zerowej – korelacja jest nieistotna. Wynik świadczy o braku wpływu paczek z błędem wagi na powstawanie zatorów.

#### 4.2. Analiza wydajności systemu I-Pack

Dla oceny wydajności systemu I-Pack policzono wskaźnik OEE (Overall Equipment Effectiveness). W tym celu zostały zebrane dane z jednego tygodnia (Tab.2).

Tab. 2. Opis wydajności systemu I-Pack dla wybranego tygodnia pracy

	Dzień tygodnia						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Planowany czas pracy [min]	1140	1140	1140	1140	570	570	1140
Postoje urządzenia [min]	83	53	52	32	31	35	47
efektywny czas pracy urządzenia [min.]	1057	1087	1088	1108	539	535	1093
Liczba zamkniętych paczek [szt.]	9284	9783	9893	8956	4645	4523	10093
Ilość wadliwa paczek [szt.]	37	45	35	41	23	19	51
Ilość poprawnie zamkniętych [szt.]	9247	9738	9858	8915	4622	4504	10042

W danych wykorzystanych do obliczenia wskaźnika został pominięty czas trwania przerwy w pracy. Dodatkowo wyliczony został czas jednego cyklu zamknięcia jednego pojemnika, który wynosi 0,125 minuty czyli 7,5 sekundy.

Aby obliczyć wskaźnik OEE należy pomnożyć przez siebie trzy składowe: dostępność, wydajność oraz jakość [5]. Zgodnie ze wzorem (3) wyznaczono OEE.

$$OEE = \text{dostępność} \times \text{wydajność} \times \text{jakość} \quad (3)$$

##### Krok 1. Dostępność urządzenia

Wynik efektywnego czasu pracy (odjęcie planowanego czasu pracy urządzenia z ilością czasu postoju maszyny z powodu obsługi czy awarii) podzielono na ilość planowanego czasu.

##### Krok 2. Współczynnik wydajności

Wyznaczono iloczyn czasu spakowania jednej paczki w warunkach idealnych z rzeczywistą liczbą spakowanych paczek. Wynik został podzielony przez efektywny czas pracy urządzenia.

### Krok 3. Współczynnik jakości

Wyznaczono różnicę ilości źle spakowanych zamówień z całkowitą ilością spakowanych paczek przez urządzenie I-Pack. Wynik został podzielony przez liczbę wszystkich zamkniętych paczek. Uzyskano wskaźnik OEE = 83%, które określa się jako dobry [7]. Obliczenia zestawiono w Tab. 3.

Tab. 3. Wyniki obliczeń składowych wskaźnika OEE: dostępności, jakości, wydajności

Wskaźniki efektywności	Dzień tygodnia							średnia	wskaźnik OEE
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
Dostępność	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9500	83%
Jakość	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9956	
Wydajność	0,88	0,90	0,91	0,81	0,86	0,85	0,92	0,8752	

Oznacza to, iż maszyna przetworzyła efektywnie 83% czasu operacyjnego. W celu poprawy wskaźnika zaleca się dalsze monitorowanie pracy urządzenia, aby jeszcze bardziej zminimalizować straty w pakowaniu. W badanym przypadku wskaźnik OEE nigdy nie wyniesie 100%, ponieważ konieczne są przerwy na uzupełnianie kleju lub na konserwację urządzenia [5].

### 4.3. Analiza efektywności na etapie pakowania

W celu dalszej analizy systemu I-Pack, zostały porównane dane dotyczące ilość zrealizowanych gotowych zamówień z 2-óch kolejnych tygodni sierpnia 2022r. Zestawiono paczki zwykłe (pakowane ręcznie) i kartony I-Pack. Te, które powstały w wyniku ręcznego pakowania, wymagają pracy zespołu składającego się z 6-ciu osób. System I-Pack, jest obsługiwany przez jedną osobę nadzorującą poziom kleju oraz ilość dekli dla pojemników w urządzeniu. Tab. 4 przedstawia ilość paczek wykonanych dla obu rodzajów zleceń danego dnia, natomiast kolumny zaznaczone szarym kolorem zawierają średnią ilość paczek pakowanych w czasie jednej godziny przez jedną osobę oraz przez urządzenie I-Pack/h. Założono, że czas pracy magazynu wynosi 19 godzin dziennie.

Tab. 4. Zestawienie ilości gotowych zamówień i średniej ilości paczek zrealizowanych w czasie 1h

Data	Ilość gotowych zamówień [szt.]		Średnia paczek pakowanych na 1robotogodzinę [szt.]	
	zwykłe	I-Pack	zwykłe	I-Pack
2022-08-01	29716	9284	260,67	488,63
2022-08-02	29217	9783	256,29	514,89
2022-08-03	29107	9893	255,32	520,68
2022-08-04	30044	8956	263,54	471,37

2022-08-05	14355	4645	251,84	488,95
2022-08-06	11977	4523	210,12	476,11
2022-08-07	29907	10093	262,34	531,21
2022-08-08	30757	9243	269,80	486,47
2022-08-09	30155	9845	264,52	518,16
2022-08-10	29141	9859	255,62	518,89
2022-08-11	28802	9198	252,65	484,11
2022-08-12	15215	4285	266,93	451,05
2022-08-13	12221	4779	214,40	503,05
2022-08-14	30211	9789	265,01	515,21

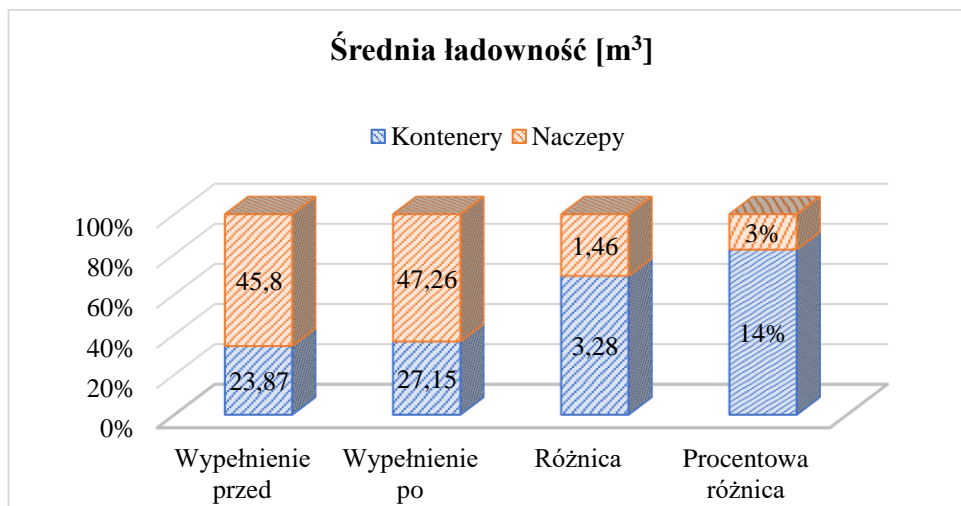
Dane wynikające z Tab. 4 świadczą o blisko dwukrotnie większej wydajności systemu I-Pack w porównaniu do ręcznego pakowania zamówień.

#### 4.4. Analiza efektywności załadunku

W przedsiębiorstwie stosuje się dwa rodzaje środków transportu gotowych zamówień, są nimi naczepy oraz kontenery. Dla analizy efektywności załadunku po wprowadzeniu kartonów systemu I-Pack zostały porównane dane średniego wypełnienia przestrzeni załadunkowej dla kontenerów oraz naczep. Kartony wykorzystywane do systemu I-Pack posiadają takie same wymiary w przypadku długości oraz szerokości, co ułatwia układanie w równe stosy. Zwykle zlecenia natomiast posiadają aż jedenaście rodzajów kartonów dopasowanych do asortymentu. Dane przedstawiające wypełnienie środka transportu zostały zgromadzone z 150 dni przed wprowadzeniem kartonów I-Pack oraz po wprowadzeniu. W Tab.5zebrano uśrednione dane dotyczące wykorzystania przestrzeni załadunkowej. Zauważalny jest wzrost wypełnienia kontenerów po zastosowaniu systemu I-Pack o 14%, natomiast przy naczepach o 3% (Rys. 6).

Tab. 5. Średnie wypełnienie transportu przed oraz po wdrożeniu systemu I-Pack

	Wypełnienie przed	Wypełnienie po	Różnica	Różnica
Kontenery	23,87 [m <sup>3</sup> ]	27,15[m <sup>3</sup> ]	3,28 [m <sup>3</sup> ]	14%
Naczepy	45,8[m <sup>3</sup> ]	47,26[m <sup>3</sup> ]	1,46[m <sup>3</sup> ]	3%



Rys.6. Wizualizacja średniego wypełnienia przed oraz po wprowadzeniu systemu I-Pack

## PODSUMOWANIE

Automatyzacja procesów logistycznych jest nieodłącznym elementem rozwoju przedsiębiorstw. Na przykładzie firmy dystrybucyjnej potwierdzono wyższą efektywność systemu automatycznego pakowania względem ręcznych rozwiązań. Zatem można twierdzić, że implementacja takich systemów przyczynia się do minimalizacji kosztów poprzez mniejszą ilość pracowników oraz zwiększenie wydajności realizowanych zamówień. Celem badania było przeanalizowanie wybranych wskaźników opisujących m.in. wydajność systemu I-Pack wspierającego logistykę realizacji zamówień magazynowych w istniejącym przedsiębiorstwie. Na podstawie przeprowadzonych analiz, stwierdzono brak zależności pomiędzy wykorzystaniem systemu I-Pack i odnotowanymi tam błędami wagi, a zacinaaniem się samej linii. Niemniej, w celu dokładniejszych interpretacji wyników zaleca się zwiększenie ilości obserwacji. W opracowaniu wykonano również analizę efektywności pakowania w systemie I-Pack względem zwykłych paczek. Na podstawie zebranych danych stwierdzono o blisko dwukrotnie większej wydajności systemu I-Pack w porównaniu do ręcznego pakowania zamówień. Wyznaczony wskaźnik OEE, który wynosi 83%, potwierdza dużą efektywność wykorzystania urządzenia. Niemniej wynik można poprawić monitorując powody postojów systemu z ich sukcesywną eliminacją. W celu analizy efektywności załadunku zostały porównane dane z okresu przed wprowadzeniem systemu I-Pack z okresem po wprowadzeniu, w odniesieniu do wypełnienia dostępnej przestrzeni ładunkowej. Jednoznacznie odnotowano większe wykorzystanie powierzchni środków transportu po wprowadzeniu systemu I-Pack do nawet 14%. Znaczący wpływ może mieć na to stały kształt kartonu. Ostatecznie, zaleca się, aby przedsiębiorstwo inwestowało w podobne, zautomatyzowane rozwiązania, które przekładają się na wymierne korzyści w postaci oszczędności.

## LITERATURA

- [1] **Głodowska K., Świdorski A.:** *Optymalizacja procesu kompletacji*, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 127 “Transport”, 2019, s. 15-24.
- [2] **Jacyna M., Kłodawski M.:** Wybrane aspekty badania wydajności procesu komisjonowania, *Logistyka*, nr 2, 2012.
- [3] **Szymoniuk A., Chudzik D.:** *Logistyka nowoczesnej gospodarki magazynowej*, Wyd. Difin, Warszawa 2018.
- [4] **Durkiewicz J.:** *Outsourcing konwersji w systemach EDI oraz B2B*, *Acta Universitatis Lodzianae. Folia Oeconomica*, 2002, t. 157, s. 143-150.
- [5] **Biały W., Hąbek P.:** *Zastosowanie wskaźnika OEE do oceny wykorzystania maszyn – studium przypadku*, *Inżynieria Systemów Technicznych*, nr 2(14), 2016, s. 55-65.
- [6] **Abolfotoh A., Singh M., Suer G.:** *Order Batching Optimization for Warehouses with Cluster-Picking*, *Procedia Manufacturing*, Volume 39, 2019.
- [7] **Dudek M.:** *Nowoczesne metody i narzędzia w inżynierii produkcji i zarządzaniu*, Wyd. AGH Kraków 2021.



# **OCENA I DIAGNOSTYKA ERGONOMICZNA NA STANOWISKU PALETOWANIA OBRZEŻY BETONOWYCH**

## **1. WPROWADZENIE**

Inżynieria produkcji obejmuje między innymi zagadnienia takie jak: planowanie, projektowanie, implementowanie i zarządzania systemami produkcyjnymi. Systemy te rozumiane są jako układy socjotechniczne, integrujące pracowników, informację, energię, materiały, narzędzia pracy i procesy w ramach całego cyklu życia produktów. W celu osiągnięcia efektywności działania tych systemów, inżynieria produkcji bazuje na naukach technicznych, ekonomicznych, humanistycznych i społecznych. Jednym z kluczowych elementów inżynierii produkcji jest orientacja na czynnik ludzki. Gdzie ciągłe doskonalenia środowiska pracy stanowi istotny element wpływający na wydajność, koszty i jakość pracy [6]. Ponadto procesy operacyjne w systemach produkcyjnych są ważne w wielu gałęziach przemysłu w obliczu konkurencyjnych wyzwań związanych z globalizacją, konkurencją rynkową i krótszymi cyklami życia produktów. Stąd poprawa wydajności systemów operacyjnych stała się priorytetem dla wielu zakładów pracy zwłaszcza w dobie Przemysłu 4.0. Procesy operacyjne zazwyczaj charakteryzują się dużą ilością ręcznej pracy wykonywanej przez pracowników. Dotyczy to przede wszystkim ludzkiej obszarów takich jak obsługa maszyn i urządzeń, montaż oraz przeładunek materiałów. Pomimo możliwości oferowanych przez automatyzację systemów produkcyjnych, wiele firm nadal polega na manualnej pracy ludzkiej w kilku obszarach ze względu na ich elastyczność i ekonomiczną opłacalność. W systemie produkcyjnego pracownicy są istotną częścią i wykonują różnorodne prace i zadania przez cały cykl życia. Zajmują się m. in. projektowaniem, produkcją, montażem, transportem, instalacją, obsługą, konserwacją oraz demontażem wszystkich zaprojektowanych systemów [16]. Choć istnieje dyscyplina naukowa Ergonomia/Czynnik ludzki, która koncentruje się na optymalizacji dobrostanu i wydajności systemu [5], to wyniki badań dowodzą [2, 15], że występowanie zaburzeń mięśniowo-szkieletowych (ZMSz) u pracowników wykonujących pracę zawodową jest powszechnym zjawiskiem w przemyśle [11]. Dlatego ważne jest stosowanie ergonomii. Kadra zarządzająca, inżynierowie i praktycy powinni wdrażać zasady i wiedzę ergonomiczną nie tylko w proces projektowania systemu produkcyjnego, ale także w proces oceny już istniejących systemów produkcyjnych, stanowisk pracy, wykonywanej pracy i zadań, produktów, środowiska pracy i systemów pracy w celu optymalizacji systemu. Muszą przy tym brać pod uwagę możliwości i ograniczenia pracowników w celu



osiągnięcia satysfakcjonującego poziomu jakości ergonomicznej, produktywności oraz dobrostanu pracowników [7].

Na ZMSz związane z wykonywaną pracą zawodową posiada wpływ szereg czynników takich jak: projekt stanowiska pracy, wykonywane zadania, metody pracy, narzędzia i ich konstrukcja oraz cechy antropometryczne pracowników [9, 10]. Występowanie ZMSz u pracowników wpływa także niekorzystnie na wyniki ekonomiczne zakładów pracy oraz jakość życia pracowników. ZMSz mogą prowadzić do dyskomfort, bólu u operatorów co w dłuższej perspektywie może prowadzić do absencji chorobowej. Przewlekłe choroby układu mięśniowo-szkieletowego rozwijają się w pewnym okresie czasu, co może prowadzić do trwałej niepełnosprawności i chorób zawodowych [4]. W Polsce w 2020 r choroby układu mięśniowo-szkieletowego były drugą najczęściej występującą przyczyną absencji chorobowej pracowników i stanowiły 16,1% wszystkich nieobecności w pracy. Spowodowało to utratę 41336,7 tysięcy dni z powodu zwolnień lekarskich [18].

Z punktu widzenia inżynierii produkcji oraz ergonomii, przy projektowaniu oraz ocenie i diagnozie systemów pracy muszą być brane pod uwagę ergonomiczne czynniki ryzyka, które przyczyniają się do powstania ZMSz. Do głównych ergonomicznych czynników ryzyka należą: pozycja operatora podczas pracy, zakres ruchów, stosowana siła, powtarzalność, drgania oraz czas trwania ruchów roboczych [1, 12, 13].

Oceny ergonomiczne wykonywane w przemyśle skupiają się przede wszystkim na ocenianiu pozycji statycznej operatorów, zakładane jako reprezentujące najgorsze scenariusze [8]. To podejście między innymi jest spowodowane brakiem odpowiednich metod analizy pracy operatora znajdującego się w ruchu podczas wykonywania zadania roboczego [3]. W wielu przypadkach przyczyną jest również złożoność procesu pracy, treści pracy realizowanej przez operatora. Czas potrzebny do wykonania oceny ergonomicznej i związane z tym koszty również odgrywają istotną rolę. Wyniki analiz statycznych pozycji operatorów są rzeczywiście przydatne, ale nie ujawniają pełnego obrazu faktycznej sytuacji, ponieważ praca wykonywana przez operatora zazwyczaj obejmuje szereg zadań, pozycji i ruchów roboczych. Paru badaczy twierdzi, że istnieje potrzeba odwrócenia wysiłku od czystej oceny analizy statycznej postawy na rzecz oceny zadań roboczych i uwzględnienia czynników związanych z czasem [17]. Uważają, że powtarzalność, czas trwania narażenia, czas regeneracji, prędkość ruchu itp. przyczyniają się w takim samym stopniu do potencjalnego ryzyka powstania ZMSz związanych z pracą, jak pozycja operatora podczas pracy i związane z tym obciążenie statyczne.

Stąd celem pracy była ergonomiczna ocena i diagnostyka na stanowisku paletowania obrzeży betonowych metodą RULA z uwzględnieniem czasu trwania operacji paletowania.

## 2. MATERIAŁY I METODY

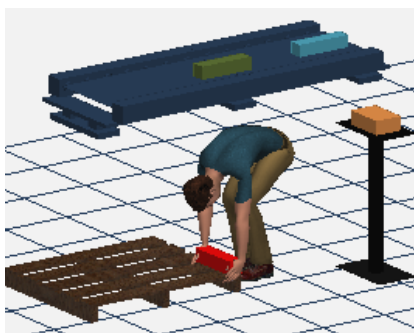
Badanie przeprowadzono w zakładzie X zajmującym się produkcją różnego rodzaju prefabrykatów betonowych stosowanych głównie w budownictwie, drogownictwie oraz architekturze krajobrazu. Pośród produkowanego asortymentu znajdowały się między innymi: kostka brukowa, płyty, obrzeża betonowe oraz krawężniki. W zależności od modelu posiadały różne wymiary, barwę oraz masę. Wytwarzane przez zakład produkcyjny

elementy betonowe na ostatnim etapie produkcji układane były przez pakowacza na paletach przeznaczonych do transportu.

### 2.1. Badane stanowisko pracy

Badanie przeprowadzono na stanowisku paletowania obrzeży betonowych. Pakowacz pracował pięć dni w tygodniu po 8 godzin (od 7:00 do 15:00). W czasie pracy przysługiwały mu trzy przerwy: dwie po 15 minut oraz jedna obiadowa trwająca 30 minut. Na badanym stanowisku znajdował się przenośnik taśmowy podający prefabrykaty betonowe, które pracownik przekładał na paletę typu euro. Zadaniem pakowacza było również naklejenie odpowiedniej etykiety z kodem kreskowym na zapełnioną paletę. Etykiety pobierał ze specjalnej drukarki, która umiejscowiona była przy stanowisku. Dodatkowo stanowisko posiadało zsymp, który przechwytywał nieodebrane przez pracownika prefabrykaty z taśmociągu.

Komputerowy model stanowiska paletowania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 Stanowisko paletowania przed interwencją ergonomiczną - model

Operatorem był mężczyzna, na stanowisku pakowacza pracował trzy lata. Podczas badania pracę wykonywał w pozycji stojącej układając na paletach ozdobne obrzeża ogrodowe o wymiarach 10x10x40cm i masie 18kg. Pełna paleta mieściła 96 obrzeży w czterech warstwach po 24 sztuki w każdej warstwie. Zadanie realizowane przez pracownika posiadało charakter powtarzalny i było realizowane w cyklu czasowym. Średni czas cyklu ułożenia 96 obrzeży na palecie wynosił  $T = 1068$  sekundy.

### 2.2. Fotografia dnia roboczego

Zastosowano obserwację bezpośrednią oraz hierarchiczną analizę zadań dla zadania paletowania wykonywanego przez operatora w cyklu czasowym. Wyłoniono czynności realizowane przez operatora oraz sporządzono chronometraż biorąc pod uwagę czas trwania poszczególnych czynności wykonywanych przez pracownika (Tab. 1).

### 2.3. Metoda RULA (Rapid Upper Limb Assessment)

Metoda RULA została opracowana przez McAtamney i Corlett w 1993r [14] do szybkiej oceny narażenia kończyn górnych na ryzyko powstania ZMSz. Metoda zapewnia łatwą do obliczenia ocenę obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego operatora. Oceniana jest

pozycja operatora, użyta siła, zaangażowanie grup mięśniowych. Brana jest również pod uwagę powtarzalność czynności oraz obciążenie statyczne.

Wynik oceny jest obliczany w skali od 1 (niski) do 7 (bardzo wysoki) i pogrupowany jest w cztery poziomy ryzyka oraz cztery kategorie działań (KD), które wskazują ramy czasowe odnoszące się do zmian na stanowisku w postaci interwencji ergonomicznej.

W metodzie określono następujące kategorie działań:

- KD1: małe ryzyko, obciążenie prawidłowe, bez szczególnego szkodliwego wpływu na układ mięśniowo-szkieletowy operatora, działania interwencyjne nie są wymagane;
- KD2: występuje ryzyko średnie, obciążenie ma niewielki szkodliwy wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy, dalsze badania i natychmiastowa interwencja nie jest wymagane, ale korekta ergonomiczna powinna być wzięta pod uwagę w przyszłych działaniach;
- KD3: wysokie ryzyko, obciążenie posiada znaczny szkodliwy wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy, dalsze badania i interwencja ergonomiczna powinna być przeprowadzona możliwie jak najszybciej;
- KD4: bardzo wysokie ryzyko, obciążenie ma bardzo duży szkodliwy wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy, badania oraz interwencja ergonomiczna wymagana jest natychmiast.

### 3. WYNIKI I OMÓWIENIE

Sporządzono chronometraż, który przedstawiono w tabeli 1.

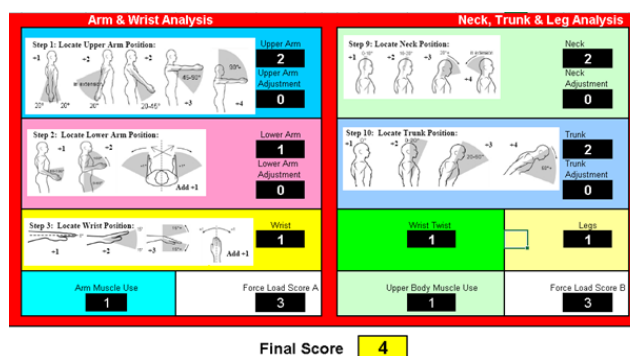
Tab. 1. Chronometraż na stanowisku paletowania obrzeży betonowych

Nr	Czynność	Czas trwania [s]	Procentowy udział w cyklu T [%]
1	Załączenie taśmociągu	2	0,2
2	Pobranie obrzeża z taśmociągu	384 (4s x 96)	35,8 (Czynność 4s powtarzana naprzemiennie z punktem 3, 96 razy)
3	Umieszczenie obrzeża na palcu	672 (7s x 96)	63,0 (Czynność 7s powtarzana naprzemiennie z punktem 2, 96 razy)
4	Wyłączenie taśmociągu	2	0,2
5	Aktywacja drukarki	2	0,2
6	Pobranie etykiety z drukarki	2	0,2
7	Przyklejenie etykiety na palec	4	0,4
	Czas trwania cyklu T [s]	1068	100

Czas trwania pojedynczego cyklu T wynosił 1068 sekund. Główny cykl zawierał wewnętrzny cykl składający się z dwóch naprzemiennie wykonywanych czynności: Pobrania

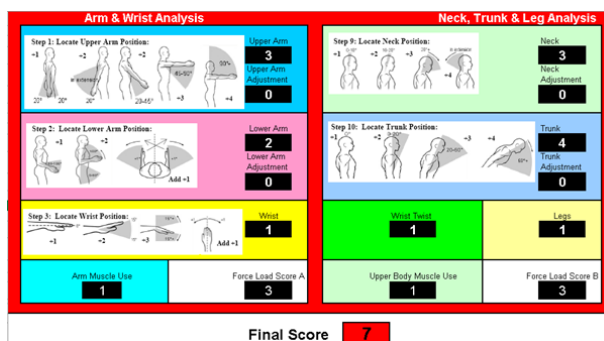
obrzeża i Umieszczenia obrzeża na palecie. Obie czynności były wykonywane przez operatora naprzemiennie 96 razy. Pozostałe czynności nr 1, 4, 5, 6, 7 występowały raz w cyklu T.

Stosując metodę RULA dokonano oceny każdej z czynności, wyniki dla czynności Pobrania obrzeża z taśmociągu oraz Odłożenie obrzeża na palecie przedstawiono odpowiednio na rys. 2 i rys. 3. Wyniki zbiorcze dla wszystkich ocenianych czynności zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 2 Ocena RULA – Pobranie obrzeża z taśmociągu

Końcowy wynik RULA dla Pobrania obrzeża z taśmociągu wyniósł 4 (rys.2). To świadczy o średnim ryzyku i został zakwalifikowany do KD2.



Rys. 3. Ocena RULA – Umieszczenie obrzeża na palecie

Końcowy wynik RULA dla czynności Umieszczenia obrzeża na palecie wyniósł 7 (rys.3). Stąd bardzo wysokie ryzyko i KD4.

Tab. 2. Ocena narażenie operatora na stanowisku paletowania obrzeży betonowych

Lp.	Czynność	Wynik RULA	Kategoria działań (ryzyko)	Udział w cyklu [%]	Interwencja słownie
1	Załączenie taśmociągu	2	1 (małe)	0,2	niewymagana
2	Pobranie obrzeża z taśmociągu	4	2 (średnie)	35,8	wymagana w przyszłości
3	Umieszczenie obrzeża na palecie	7	4 (bardzo wysokie)	63,0	wymagana natychmiast
4	Wyłączenie taśmociągu	2	1 (małe)	0,2	niewymagana
5	Aktywacja drukarki	3	2 (średnie)	0,2	wymagana w przyszłości
6	Pobranie etykiety z drukarki	3	2 (średnie)	0,2	wymagana w przyszłości
7	Przyklejenie etykiety na palecie	4	2 (średnie)	0,4	wymagana w przyszłości

Analizując otrzymane wyniki (tab. 2) stwierdzono, że dwie czynności z siedmiu czynności (Załączenie taśmociągu oraz Wyłączenie taśmociągu) charakteryzują się małym ryzykiem wystąpienia ZMSz i zakwalifikowano je do KD1, która nie wymaga interwencji, jeżeli praca nie jest wykonywana przez dłuższy czas.

Kolejne cztery czynności wykonywane przez operatora (Pobranie obrzeża, Aktywacja drukarki, Pobranie etykiety, Przyklejenie etykiety) zakwalifikowano do KD2. Ryzyko jest średnie stąd dalsze badania i zmiany na stanowisku powinny być rozważone.

Jedną czynność (Umieszczenie obrzeża na palecie) związane jest z bardzo wysokim ryzykiem wystąpienia ZMSz, stąd czynność przypisano do KD4. W przypadku tej czynności obciążenie posiada znaczny szkodliwy wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy operatora, stąd dalsze badania i interwencja ergonomiczna powinna być przeprowadzona natychmiast.

Analizując wyniki badań pod kątem czasu trwania czynności z uwzględnieniem czasu trwania cyklu T zaobserwowano (tab. 1, tab. 2), że w KD1 (czynności nr 1 i nr 4) operator łącznie przebywał 4 sekundy co stanowi 0,4% czasu trwania cyklu T. Z kolei w przypadku KD2 (czynności nr 2, 5, 6, 7) łączny czas przebywania operatora wynosi 392 sekundy co stanowi 36,6% czasu trwania cyklu T. Natomiast w przypadku KD4 (czynność nr 3) czas przebywania wynosi 672 sekundy – 63,0% czasu cyklu T.

Grupując czynności pod względem funkcji stwierdzono, że sterowanie taśmociągami (Załączenie i Wyłączenie taśmociągu) nie stwarza zagrożenia, ryzyko małe. Ponadto w pojedynczym cyklu sterowanie taśmociągami trwa łącznie 4 sekundy i stanowi tylko 0,4% czasu trwania całego cyklu T. Z kolei trzy czynności związane z etykietowaniem palety

(nr 5, 6, 7) nie stanowią znaczącego zagrożenia pomimo ryzyka średniego, gdyż łączny czas ich trwania w cyklu T wynosił tylko 8 sekund – 0,8% T. Przyczyn ryzyka średniego upatruje się w nieprawidłowej pozycji przyjmowanej przez operatora, która spowodowana może być tempem pracy jak również brakiem podstawowej wiedzy ergonomicznej.

Kluczowy wpływ na wynik końcowy posiadały główne czynności związane z paletowaniem (nr 2 i 3): Pobranie obrzeża z taśmociągu i Umieszczenie na palecie. Obie czynności odbywały się w cyklu wewnętrznym naprzemiennie 96 razy. W sumie Pobranie trwało ok. 1/3 czasu cyklu T. Natomiast Odłożenie na paletę ok. 2/3 T. Pobranie obrzeża zakwalifikowano do KD2. Na wynik końcowy miała wpływ znaczna masa obrzeża (18kg), nadmierna częstość powtarzania czynności. Natomiast w przypadku Odkładania obrzeża na paletę oprócz dźwiganej masy, nadmiernej powtarzalności czynności decydowała wymuszona szkodliwa pozycja operatora spowodowana przede wszystkim niewłaściwą wysokością płaszczyzny pracy. Paleta zlokalizowana była na posadzce co wymuszało duże pochycenie operatora podczas odkładania.

Stanowisko paletowania ze względu na przebywanie operatora 2/3 czasu cyklu T w czwartej kategorii działań obciążonej bardzo wysokim ryzykiem należy uznać za stanowisko charakteryzujące się bardzo wysokim ryzykiem zawodowym. Praca na tym stanowisku zagraża zdrowiu operatora i może również doprowadzić do absencji chorobowej operatora.

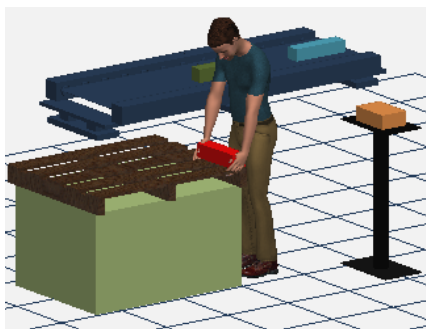
#### **4. PROJEKT KONCEPCYJNY INTERWENCJI ERGONOMICZNEJ**

W celu zmniejszenia obciążenia operatora oraz obniżenia ryzyka pojawienia się ZMSz należy przede wszystkim poprawić pozycję pracy pracownika podczas układania obrzeży na palecie.

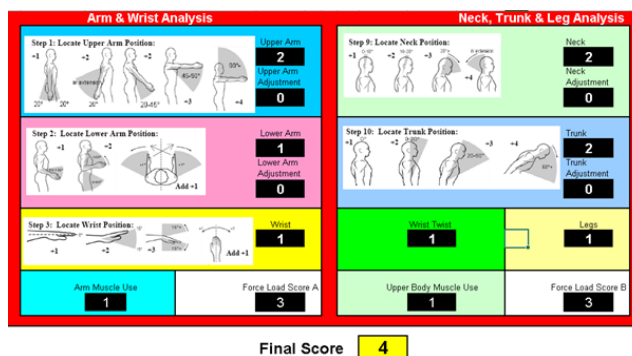
Zaproponowano projekt koncepcyjny interwencji ergonomicznej na stanowisku paletowania obrzeży obejmujący:

- modyfikację struktury przestrzennej stanowiska pracy obejmującej umieszczenie palety na podwyższeniu w celu zmniejszenia kąta pochycenia pleców pracownika podczas odkładania obrzeży,
- wprowadzenia rotacji pracowników na stanowiskach pracy w celu obniżenia czasu narażenia operatora,
- przeprowadzenie szkoleń pracowników z podstaw ergonomii stanowiska pracy, ekonomiki ruchów roboczych oraz prawidłowych metod i pozycji podczas pracy.

Projekt koncepcyjny po proponowanych zmianach w ramach interwencji ergonomicznej przedstawiono na rysunku 4. Natomiast weryfikację koncepcji wykonano metodą RULA w oparciu o proponowane zmiany przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4 Stanowisko paletowania po interwencji ergonomicznej – model



Rys. 5 Ocena RULA – Umieszczenie obrzeża na palecie po interwencji ergonomicznej

Umieszczenie palety na podwyższeniu umożliwiło obniżenie ryzyka z poziomu bardzo wysokiego do poziomu średniego (z KD4 do KD2).

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Ergonomiczna ocena i diagnoza metodą RULA na stanowisku paletowania obrzeży betonowych wykazała, że praca na stanowisku jest obciążona wysokim ryzykiem ZMSz. W dłuższej perspektywie tak wysokie ryzyko może powodować problemy zdrowotne u operatorów i w następnej absencji chorobową.

Analiza ryzyka pokazała, że:

- spośród siedmiu czynności w dwóch zidentyfikowano ryzyko małe, w czterech – ryzyko średnie, w jednej bardzo wysokie ryzyko wystąpienia ZMSz,
- operator 63% czasu cyklu T przebywa w szkodliwych pozycjach pracy, z bardzo dużym poziomem narażenia na ZMSz i korekta ergonomiczna wymagana jest natychmiast.

Wdrożenie zaproponowanych rozwiązań powinno obniżyć poziom ryzyka oraz czas narażenia operatorów. Ponadto powinno obniżyć negatywny wpływ na zdrowie pracowników, poprawić ich dobrostan i przyczynić się do obniżenia ryzyka absencji chorobowej.

Przebadano paletowanie jednego asortymentu o określonych wymiarach i masie. Zakład produkował całą gamę asortymentu betonowego. Stąd przyszłe prace powinny obejmować badania paletowania pozostałego asortymentu np. kostki brukowej, krawężników, obrzeży o różnorodnych wymiarach i masie. Pozwoli to na uzyskanie pełnego obrazu o poziomie narażenia operatorów na ZMSz podczas paletowania oraz powinno pozwolić na zaprojektowanie właściwego systemu rotacji pracowników.

## LITERATURA

- [1] **Bernard, B.P. & Putz-Anderson, V.** (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors; a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*". U.S. Department of health and human services, Columbia Parkway.
- [2] **Candan, S. A., Sahin, U. K., & Akoğlu, S.** (2019). *The investigation of work-related musculoskeletal disorders among female workers in a hazelnut factory: Prevalence, working posture, work-related and psychosocial factors*. International journal of industrial ergonomics, 74, 102838.
- [3] **Chaffin, D. B.** (2005). Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics*, 48(5), 478-491.
- [4] Dz.U. (2022). Obwieszczenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 9 sierpnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie chorób zawodowych". poz 1836.
- [5] IEA (International Ergonomics Asosiation), <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/>
- [6] Komitet Inżynierii Produkcji PAN. (2012). *Istota inżynierii produkcji*. Warszawa.
- [7] **Lasota, A. M.** (2020). *A new approach to ergonomic physical risk evaluation in multi-purpose workplaces*. *Tehnički vjesnik*, 27(2), 467-474.
- [8] **Lasota, A.** (2013). *Analiza obciążenia pracą metodą OWAS*. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, 16(3), 35-39.
- [9] **Lasota, A. M., & Hankiewicz, K.** (2016). *Assessment of risk to work-related musculoskeletal disorders of upper limbs at welding stations*. In International Symposium on Occupational Safety and Hygiene-SHO.
- [10] **Lasota, A. M., & Hankiewicz, K.** (2016). *Evaluation of ergonomic risk in the production line of frozen food products*. In *2016 International Conference on Economics and Management Innovations (pp. 34-40)*. Atlantis Press.
- [11] **Lasota, A. M., & Hankiewicz, K.** (2020). *Self-reported fatigue and health complaints of refuse collectors*. *Central European Journal of Operations Research*, 28(2), 633-643.



- [12] **Lasota, A. M., & Hankiewicz, K.** (2017). *The study of postural workload in assembly of furniture upholstery*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 137, p. 07002). EDP Sciences.
- [13] **Lasota, A.M., & Hankiewicz, K.** (2016). *Working postures of spot welding machine operators*. Occupational Safety and Hygiene IV. 273-6.
- [14] **McAtamney, L., & Corlett, E. N.** (1993). *RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*. Applied ergonomics, 24(2), 91-99.
- [15] **Rathore, B., Pundir, A. K., & Iqbal, R.** (2020). *Ergonomic risk factors in glass artware industries and prevalence of musculoskeletal disorder*. International Journal of Industrial Ergonomics, 80, 103043.
- [16] **Tytyk, E.** (2001). *Projektowanie ergonomiczne*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [17] **Wells, R., Mathiassen, S. E., Medbo, L., & Winkel, J.** (2007). *Time - a key issue for musculoskeletal health and manufacturing*. Applied Ergonomics, 38(6), 733-744.
- [18] **ZUS.** (2021). *Absencja chorobowa w 2020 roku*. Zakład Ubezpieczeń Społecznych, Warszawa.

# ZASTOSOWANIE UCZENIA MASZYNOWEGO W PREDYKCYJNYM UTRZYMANIU RUCHU

## 1. WPROWADZENIE

Dział utrzymania ruchu jest ściśle połączony z produkcją. Zgodnie z definicją do jego głównych zadań należy zapewnienie odpowiedniej infrastruktury technicznej takiej jak maszyny czy instalacje potrzebne przy produkcji. Celem utrzymania ruchu jest zadbanie, aby produkcja odbywała się w sposób możliwie ciągły. Do głównych zadań działu należy między innymi konserwacja, przegląd i naprawa maszyn oraz innych urządzeń. Również ważne jest dbanie o odpowiedni zapas części zamiennych i zarządzanie nimi. Dział utrzymania ruchu powinien prowadzić spis całego asortymentu zakładu. Jako że jest to dział, który w dużej mierze wpływa na zyski i straty w przedsiębiorstwie, jest on odpowiedzialny za prowadzenie odpowiedniej i ustalonej strategii utrzymania ruchu oraz dbanie o wysoki poziom energooszczędności używanych maszyn.[1]

Początkowo (przed I wojną światową) maszyny, które były używane do produkcji nie były skomplikowane a do ich konserwacji wystarczały proste czynności takie jak smarowanie czy ostrzenie. Naprawa maszyn czy ich konserwacja nie wymagały wykwalifikowanych pracowników, a samo uszkodzenie maszyny nie miało dużego wpływu na ciągłość produkcji. Dlatego w utrzymaniu ruchu stosowano podejście reaktywne (reactive maintenance), inaczej nazywane strategią pracy do uszkodzenia (Run To Failure – RTF). Polegało to na tym, że podejmowano czynności naprawczo-konserwacyjne dopiero gdy wystąpiła usterka. Sam koszt napraw oraz ewentualny straty z przestojów były uznawane za losowe i ciężkie do przewidzenia.

Z początkiem I wojny światowej z powodu zarówno braku siły roboczej jak i dużego zapotrzebowania na broń, zaczęły powstawać bardziej skomplikowane maszyny (często sterowane numerycznie), w których konieczność naprawiania usterek wymagała już wykwalifikowanych pracowników lub posiadania dodatkowych części. Co za tym idzie ich naprawa trwała dłużej a postój maszyny znacznie opóźniał produkcję i powodował duże straty. W związku z tym pojawiła się nowa koncepcja systemu planowo-zapobiegawczych remontów. Polega ona na wykonywaniu odpowiednich czynności potrzebnych do ciągłej pracy maszyny co określony czas lub po danej ilości cykli, które wykonała (strategia wg resursu). Do działu utrzymania ruchu wprowadzono koncepcję zapobiegania uszkodzeniom (prewencyjne utrzymanie ruchu), większe znaczenie systemów planowania i sterowania utrzymaniem ruchu w celu obniżenia kosztów oraz większe zainteresowanie zarządu przedsiębiorstwa eksploatacją urządzeń i przekazanie na to większego kapitału.

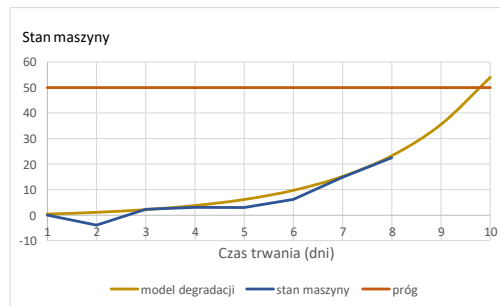
W przypadku, kiedy w maszynach we wczesnej fazie użytkowania występowało dużo uszkodzeń w jednym momencie, strategia prewencyjnego utrzymania ruchu przestała się sprawdzać. Ilość używanych maszyn jak i ich wartość gwałtownie wzrosły. W latach 70-tych XX wieku wprowadzono nowe podejście w strategii utrzymania ruchu, którego głównym celem było zapewnienie bezuszkodzeniowej pracy wszystkich maszyn i innych urządzeń podczas całego czasu, w którym będą użytkowane. Główne zmiany jakie wówczas zachodziły w produkcji to m.in. duży wzrost automatyzacji i robotyzacji procesów wytwarzania, rozwój narzędzi służących do diagnostyki technicznej oraz wzrost kosztów utrzymania ruchu. Pojawiły się również nowe koncepcje ważne dla przedsiębiorstw, takie jak zarządzanie zapasami według koncepcji Just In Time oraz doskonalenie jakości wyrobów w duchu Total Quality Management (TQM). Te wszystkie czynniki przełożyły się na powstanie nowej strategii, w której równie ważną rolę odgrywały narzędzia służące do wspierania decyzji np. ocena ryzyka czy modele intensywności uszkodzeń jak i nowe techniki utrzymania ruchu takie jak monitorowanie stanu urządzeń. Ważna była również zmiana w myśleniu organizacji prowadząca do współuczestnictwa i pracy zespołowej. Powstała strategia predykcyjnego utrzymania ruchu – w tym RCM (Reliability Centered Maintenance) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność i TPM (Total Productive Maintenance) – całościowe utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją.

## **2. POZOSTAŁY OKRES UŻYTKOWANIA – RUL (REMAINING USEFUL LIFE)**

RUL (Remaining Useful Life) czyli pozostały czas użytkowania jest jednym z narzędzi służącym do określania żywotności maszyn w systemie predykcyjnego utrzymania ruchu. Pozwala on na zaplanowanie potrzebnych konserwacji, wymian części czy zaplanowanie kupna nowej maszyny. Dzięki temu ograniczane są przestoje oraz nieplanowane wydatki przedsiębiorstwa. RUL pozwala nie tylko na oszacowanie pozostałego czasu użytkowania, ale również gwarantuje pewność prognozy. W zależności od dostępności danych, RUL może być wyznaczony z pomocą [2]:

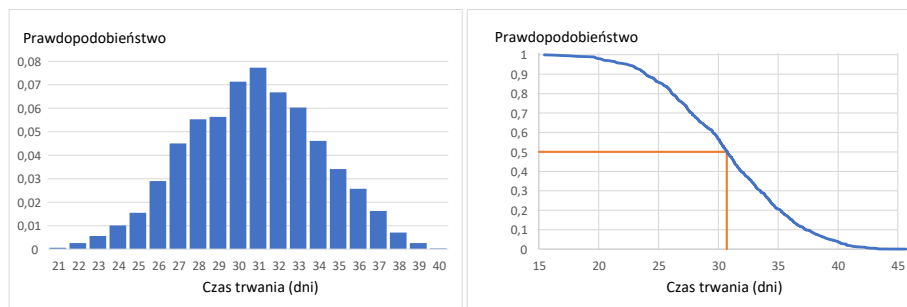
- modeli degradacji,
- modeli przeżycia,
- modeli podobieństwa.

W przypadku braku danych historycznych do prognozowania RUL niezbędny jest wybór wskaźnika pozwalającego na określenie aktualnego stanu maszyny, przyjęcie modelu degradacji opisującego sposób zmian tego wskaźnika oraz jego wartości progowej świadczącej o awarii. Rys. 1 pokazuje predykcję awarii maszyny na podstawie wykładniczego modelu degradacji i ustalonej wartości progowej przyjętego wskaźnika.



Rys. 1. Predykcja awarii na podstawie wykładniczego modelu degradacji i ustalonej wartości progowej (szacowany RUL wynosi niecałe 2 dni)

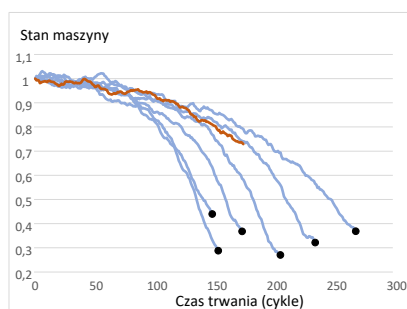
Do skonstruowania modelu przeżycia niezbędne są dane historyczne dotyczące awarii maszyn pozwalające na wyznaczenie czasu przeżycia (czasu trwania) definiowanego jako czas bezawaryjnej pracy tzn. czas pomiędzy stanem początkowym, a stanem końcowym tj. awarią maszyny. Czas przeżycia traktowany jest jako zmienna losowa, której rozkład estymowany jest na podstawie danych empirycznych (zazwyczaj wykorzystywane są rozkład wykładniczy i rozkład Weibulla). Po dopasowaniu rozkładu RUL wyznaczany jest jako jego mediana więc jest on estymowany jako czas obserwacji, w którym połowa obserwowanych maszyn ulega awarii. Znając rozkład czasu przeżycia, tzn. funkcję gęstości rozkładu i jego dystrybuantę, można również wyznaczyć funkcję przeżycia, która jest dopełnieniem dystrybuanty do jedynki. Funkcja ta przedstawia prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy w funkcji czasu. Na Rys. 2. pokazany został histogram przedstawiający przykładowy rozkład czasu przeżycia wraz z odpowiadającą mu funkcją przeżycia.



Rys. 2. Predykcja awarii na podstawie modelu przeżycia (po lewej histogram dopasowanego rozkładu, po prawej funkcja przeżycia, szacowany RUL wynosi około 31 dni)

Modele podobieństwa wymagają ciągu danych historycznych zebranych podczas monitorowania stanu technicznego maszyn od stanu początkowego do momentu wystąpienia awarii. Zarejestrowane, w trakcie degradacji stanu maszyn, odczyty czujników pozwalają na wykreślenie ich profili degradacji. Oszacowanie wartości wskaźnika RUL monitorowanej maszyny może być przeprowadzone przez znalezienie najbardziej podobnego

profilu. Na Rys. 3. pokazane zostały przykładowe profile degradacji wykorzystane do prognozowania RUL monitorowanej maszyny.



Rys. 3. Predykcja awarii na podstawie modelu podobieństwa (linie niebieskie przedstawiają dane innych maszyn, linia czerwona stan aktualnej maszyny, czarne kropki reprezentują awarie, szacowany RUL wynosi około 60 cykli: aktualny cykl około 180, awaria maszyny o podobnych zmianach stanu wystąpiła w cyklu 240)

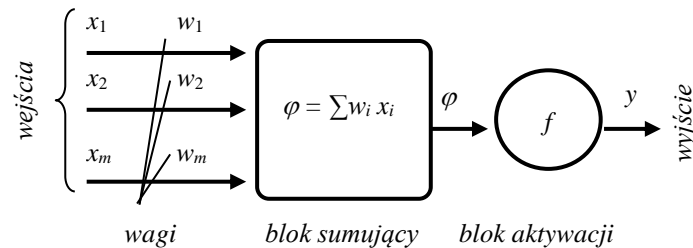
Dostępność pełnych danych historycznych umożliwia konstrukcję modeli z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego Machine Learning (ML). Techniki te pozwalają na wyszukiwanie wzorców w analizowanych danych w wyniku procesu uczenia się. W istniejącej literaturze można znaleźć rozwiązania z wykorzystaniem metody wektorów nośnych (Support Vector Machine SVM) [3, 4], sztucznych sieci neuronowych (Artificial Neural Network ANN) [5, 6, 7] oraz metody hybrydowe łączące kilka technik [8, 9]. Najliczniej prezentowane rozwiązania pozwalające na szacowanie RUL, wykorzystują różne typy sieci neuronowych, zaczynając od najprostszej architektury w postaci wielowarstwowego perceptronu [5], przez sieci konwolucyjne [6] i rekurencyjne [7]. W prezentowanym artykule przedyskutowana i zweryfikowana została możliwość predykcji wartości wskaźnika RUL za pomocą jednokierunkowej wielowarstwowej sieci neuronowej.

### 3. SZTUCZNA SIĘĆ NEURONOWA

Sieć neuronowa jest wzorowanym na funkcjonowaniu układu nerwowego systemem przeznaczonym do przetwarzania informacji. Bazuje ona na uproszczonym modelu działania mózgu. Podobnie jak w przypadku sieci biologicznych, podstawowym elementem sztucznej sieci jest neuron [3]. Stosuje się uproszczony model neuronu w postaci przedstawionej na Rys. 4.

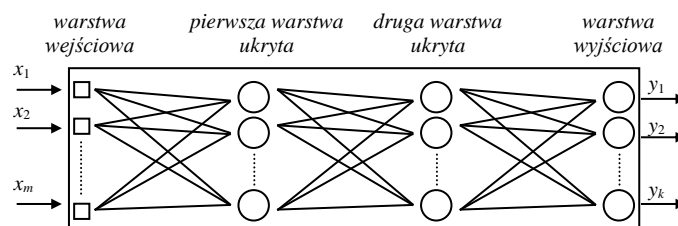
W modelu tym wejścia są odpowiednikami dendrytów w neuronie biologicznym. Stanowią one drogi, którymi sygnały są wprowadzane do wnętrza neuronu. Wagi to odpowiedniki synaps, które decydują o wzmacnieniu lub osłabieniu sygnału. W sztucznym neuronie są one liczbami przez które mnożona jest wartość sygnału pojawiającego się na wejściu. Dobierając odpowiednio wagę można zdecydować o wpływie konkretnego wejścia na wartość sygnału wyjściowego. Blok sumujący i aktywacji stanowią odpowiednik ciała komórkowego. Blok sumujący realizuje pierwszy etap przetwarzania sygnałów wejściowych – kumulację (dodawanie). Blok aktywacji dodatkowo przetwarza skumulowany

sygnał i przesyła go dalej jeżeli osiągnął odpowiedni poziom pobudzenia. Sygnał opuszcza neuron poprzez wyjście, które stanowi odpowiednik aksonu.



Rys. 4. Matematyczny model neuronu

Sieć neuronowa składa się z wielu neuronów. Najprostszym rodzajem sieci są sieci jednowarstwowe składające się z niepołączonych neuronów, ułożonych obok siebie. Takie sieci nazywane są perceptronami prostymi i mogą być stosowane jedynie do rozwiązywania wąskiej klasy zadań. Do rozwiązywania bardziej złożonych problemów mogą być już wykorzystywane perceptrony wielowarstwowe (Multilayer Perceptron, MLP), które są jednokierunkowymi sieciami wielowarstwowymi (Rys. 5). Sieci tego typu zawierają kilka warstw neuronów a każda warstwa składa się, tak jak w przypadku perceptronu prostego, z niepołączonych neuronów, ułożonych obok siebie. Sygnał wyjściowy każdego z neuronów warstwy pierwszej trafia na wejście wszystkich neuronów warstwy drugiej, sygnały wyjściowe warstwy drugiej stanowią wejście warstwy trzeciej, itd. Sygnały wyjściowe ostatniej warstwy neuronów stanowią wyjście całej sieci. Pojedynczy neuron może łączyć się z dowolną liczbą neuronów warstwy następnej pomimo tego, że ma tylko jedno wyjście dzięki rozwidleniu połączenia na odpowiednią liczbę gałęzi. Rozwidlenie wyjścia nie oznacza, że sygnał wyjściowy jest dzielony. W każdej gałęzi ma on wartość taką jaką wyszła z neuronu macierzystego. Podobny mechanizm występuje w neuronach biologicznych: gdzie każda komórka ma tylko jeden akson, który może się rozgałęziać umożliwiając połączenie z kilkoma neuronami.



Rys. 5. Perceptron trójwarstwowy

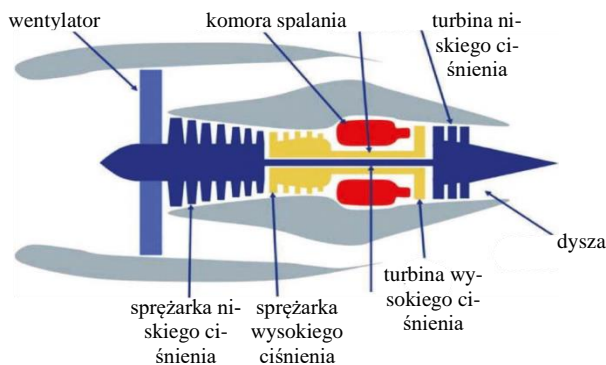
Poszczególne warstwy neuronów w sieci nazywane są zgodnie z kolejnością ich występowania np. warstwa pierwsza, warstwa druga, itp. Stosowane jest również

nazewnictwo odpowiadające funkcji jaką pełnią poszczególne warstwy. W tej konwencji wyróżnia się dodatkowo warstwę wejściową, której jedynym zadaniem jest rozgałęzienie sygnałów wejściowych w taki sposób, aby mogły trafić do wszystkich neuronów pierwszej, właściwej warstwy neuronów. Warstwa wejściowa nie wykonuje żadnego przetwarzania sygnałów, a jej obecność jest tak oczywista, że pomija się ją podając liczbę warstw sieci. Specjalną nazwę nadaje się również ostatniej warstwie sieci. Sygnały wyjściowe neuronów tej warstwy są jednocześnie wyjściem całej sieci, nazywana jest więc ona warstwą wyjściową. Wszystkie pozostałe warstwy sieci nazywane są warstwami ukrytymi. Na Rys. 5 została przedstawiona trójwarstwowa sieć neuronowa z zaznaczonymi nazwami warstw.

Do realizacji dowolnego zadania konieczne jest nauczenie sieci prawidłowego przetwarzania informacji. W tym celu określa się zbiór przykładowych danych wejściowych i odpowiadających im, pożądanych wartości wyjściowych (tzw. par uczących), a następnie dobiera się wartości wag w taki sposób, aby sieć uzyskiwała założone wartości wyjściowe dla wszystkich wartości wejściowych. Taki sposób dopasowywania wag sieci nazywany jest uczeniem z nauczycielem: sieć przetwarza dane wejściowe ze zbioru uczącego, natomiast nauczyciel podpowiada prawidłową odpowiedź. Różnica pomiędzy odpowiedzią uzyskaną i pożądaną jest miarą błędu, która zostaje wykorzystana do skorygowania wartości wag sieci. Proces uczenia sprowadza się więc do minimalizacji wartości błędu w przestrzeni wag. Stosowane są również strategie uczenia bez nauczyciela, w których pożądana odpowiedź nie jest znana a sieć musi sama wykrywać wszystkie zależności, linie podziału i inne charakterystyki danych wejściowych.

#### 4. PROGNOZA RUL (REMAINING USEFUL LIFE)

W ramach przeprowadzonych badań wykorzystane zostały popularne dane benchmarkowe udostępnione przez NASA opisujące degradację silnika turbowentylatorowego [10]. Dane zostały wygenerowane w programie symulacyjnym C-MAPSS [11] dla silnika, którego schemat ideowy został pokazany na Rys. 6.

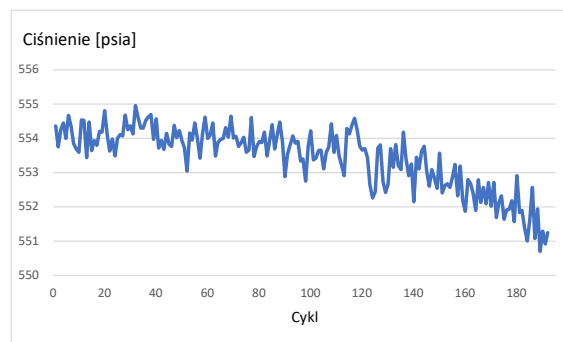


Rys. 6. Schemat ideowy symulowanego silnika [11]

Udostępniony zbiór zawiera 4 podzbiory danych. Wykorzystywany w przeprowadzonym eksperymencie pierwszy podzbiór FD001 zawiera podzielone na dwie części (dane do uczenia i do testowania) dane dwustu silników, dla których symulowana była usterka. Dane zawierają identyfikator symulowanego silnika, jego aktualny cykl pracy, trzy parametry opisujące warunki operacyjne oraz sygnały z 21 czujników monitorujących temperaturę, ciśnienie, prędkość turbiny czy wyciek paliwa z silnika. Pierwszy wpis dla każdego silnika zaczyna się od innego nieznanego stopnia początkowego zużycia. Dane z kolejnych wpisów opisują stopniowe pogarszanie stanu silnika. W podzbiórze do uczenia ostatni wpis opisuje awarię silnika, w podzbiórze do testowania wpisy kończą się przed awarią, którą należy poprawnie oszacować. W celu weryfikacji jakości prognozy zbiór zawiera także rzeczywistą wartość RUL dla silników ze zbioru testowego. Cztery początkowe cykle pracy silnika numer 1 ze zbioru uczącego zostały zebrane w Tab. 1 a przebieg zmian ciśnienia zarejestrowany przez czujnik nr 7 umieszczony na wyjściu sprężarki wysokiego ciśnienia został pokazany na Rys. 7.

Tab.1. Fragment zbioru uczącego

id	cykl	warunki operacyjne			sygnały z czujników				
		op1	op2	op3	s1	s2	...	s20	s21
1	1	-0,0007	-0,0004	100	518,67	641,82		39,06	23,419
1	2	0,0019	-0,0003	100	518,67	642,15		39	23,424
1	3	-0,0043	0,0003	100	518,67	642,35		38,95	23,344
1	4	0,0007	0	100	518,67	642,35		38,88	23,374



Rys. 7. Zmiany ciśnienia na wyjściu sprężarki wysokiego ciśnienia

Dane opisujące warunki operacyjne i sygnały z czujników zostały poddane normalizacji do przedziału  $[0, 1]$  przy pomocy metody min-max

$$x_{norm} = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}), \quad (1)$$

gdzie  $x$ ,  $x_{max}$ ,  $x_{min}$  to odpowiednio normalizowany sygnał oraz jego wartość maksymalna i minimalna.



Problem prognozowania wartości wskaźnika RUL został transformowany do postaci zadania klasyfikacji binarnej. Dla przyjętego horyzontu czasowego (w przedstawionych wynikach 30 cykli pracy silnika) wprowadzony został binarny wskaźnik RUL (bRUL), któremu przypisywana była wartość 0 w przypadku, gdy rzeczywisty RUL przekraczał przyjętą wartość (tzn. 30 cykli) a wartość 1 jeśli okres użytkowania był krótszy.

Do rozwiązania zadania wykorzystana została jednokierunkowa sieć neuronowa o architekturze pokazanej na Rys. 8. Trzy warstwy neuronów pozwalają na zamodelowanie przy pomocy sieci dowolnego odwzorowania danych wejściowych w wyjściowe. Warstwy ukryte zostały zbudowane z 10 neuronów z funkcjami aktywacji w postaci odcinkowo liniowej funkcji ReLU (Rectified Linear Unit)

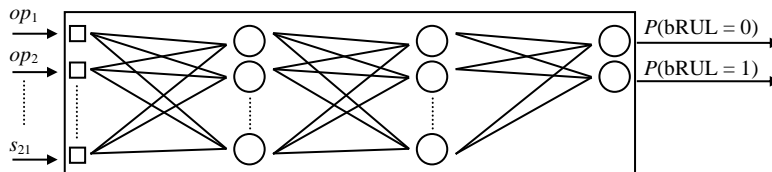
$$y = \max(0, \varphi), \quad (2)$$

gdzie:  $\varphi = \sum w_i x_i$ ;  $w_i$ ,  $x_i$  i  $y$  to wagi, sygnały wejściowe oraz sygnał wyjściowy neuronu.

Warstwę wyjściową zbudowano z 2 neuronów odpowiadających dwóm rozpoznawanym klasom: (bRUL = 0) i (bRUL = 1). Funkcje aktywacji neuronów wyjściowych zostały przyjęte w postaci funkcji Softmax (smooth approximation of max)

$$\hat{y}_i = \exp(y_i) / \sum \exp(y_j), \quad (3)$$

gdzie:  $y_i$  oraz  $\hat{y}_i$  to oryginalny i przekształcony sygnał wyjściowy;  $\hat{y}_i$  przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1 i może być traktowany jako prawdopodobieństwo przynależności danych podanych na wejście sieci do klasy rozpoznawanej na  $i$ -tym wyjściu, na Rys.8 wyjścia sieci odpowiadają za wyznaczenie prawdopodobieństw dla zdarzeń: (bRUL = 0) i (bRUL = 1).



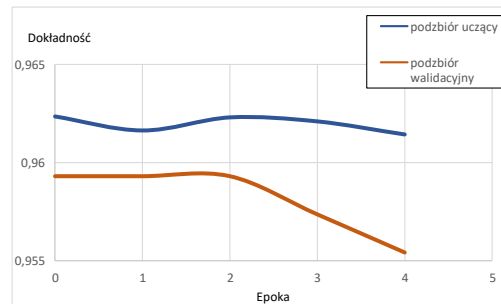
Rys. 8. Klasyfikator binarny do prognozowania wartości wskaźnika RUL

Klasyfikator został zaprojektowany w środowisku Google Colab w języku Python 3.7.12 za pomocą bibliotek TensorFlow i Keras w wersji 2.7.0. Uczenie było przeprowadzane z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego adam (Adaptive Moment Estimation). Na Rys. 9 pokazany został fragment skryptu przygotowującego sieć neuronową z Rys 8 oraz podsumowanie tak otrzymanego modelu (przygotowane za pomocą funkcji „summary()”). Jak wynika z Rys. 9 utworzony model ma 382 parametry, które muszą być dopasowane w trakcie uczenia. Maksymalną liczbę epok ustawiono na 100 a w celu zredukowania efektu przeuczenia skorzystano z metody wczesnego zakończenia (early stopping). Wagi początkowe sieci neuronowej są inicjowane wartościami losowymi co wpływa na przebieg procesu uczenia. Na Rys. 10 pokazany został proces uczenia, który metoda early stopping zatrzymała po czwartej epoce. Dokładności otrzymanego

klasyfikatora wraz z macierzami pomyłek dla podzbioru uczącego i testowego zostały zebrane w Tab. 2.

<pre>nn = Sequential() nn.add(Dense(10, activation="relu",             input_shape=(24,))) nn.add(Dense(10, activation="relu")) nn.add(Dense(2, activation=             'softmax')) nn.compile(optimizer='adam',             loss=             'categorical_crossentropy',             metrics=['accuracy'])</pre>	<pre>Model: "sequential_1" ----- Layer (type)                 Param # ----- dense_1 (Dense)              250 dense_2 (Dense)              110 dense_3 (Dense)               22 ----- Total params: 382 (1.49 KB) Trainable params: 382 (1.49 KB)</pre>
--	--

Rys. 9. Definicja i podsumowanie modelu klasyfikatora



Rys. 11. Przebieg procesu uczenia

Tab.2. Dokładność i macierze pomyłek otrzymanego klasyfikatora

	Podzbiór uczący	Podzbiór testowy															
<b>Dokładność</b>	95,9%	98,7%															
<b>Macierz pomyłek</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">prognoza</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="2">rzeczywistość</th> <th>0</th> <td>97,0</td> <td>3,0</td> </tr> <tr> <th>1</th> <td>10,5</td> <td>89,5</td> </tr> </tbody> </table>				prognoza				0	1	rzeczywistość	0	97,0	3,0	1	10,5	89,5
			prognoza														
			0	1													
rzeczywistość	0	97,0	3,0														
	1	10,5	89,5														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">prognoza</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>0</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="2">rzeczywistość</th> <th>0</th> <td>99,4</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <th>1</th> <td>28,9</td> <td>71,1</td> </tr> </tbody> </table>				prognoza				0	1	rzeczywistość	0	99,4	0,6	1	28,9	71,1	
		prognoza															
		0	1														
rzeczywistość	0	99,4	0,6														
	1	28,9	71,1														

## PODSUMOWANIE

W prezentowanym artykule przedyskutowana i zweryfikowana została możliwość predykcji wartości wskaźnika RUL za pomocą jednokierunkowej wielowarstwowej sieci neuronowej. Otrzymane dokładności modelu: 95,9% dla zbioru uczącego i 98,7% dla zbioru testowego, wskazują na jego dużą skuteczność w ocenie możliwości wystąpienia

awarii silnika. Dokładność dla podzbioru testowego, który nie był używany w trakcie doboru wag sieci, jest nawet większa niż dla zbioru uczącego. Macierz pomyłek dla zbioru testowego ujawnia jednak pewną wadę modelu, który z dokładnością 99,4% ocenia stan silnika jako dobry (bRUL = 0) ale przy ocenie stanu bliskiego awarii (bRUL = 1) ma już dokładność równą tylko (71,1%). Problem ten jest konsekwencją nierozważonego zbioru danych uczących, w którym jest duża przewaga stanów dobrych. Rozwiązaniem tego problemu byłoby skorzystanie z technik dla nieźrównoważonych danych takich jak np. waznienie klas.

## LITERATURA

- [1] **S. Legutko**, *Trendy Rozwoju Utrzymania Ruchu Urządzeń i Maszyn*. Eksploatacja i niezawodność 2/2009.
- [2] **A. Baru, R. Johnson**, *Three Ways to Estimate Remaining Useful Life for Predictive Maintenance*. <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/three-ways-to-estimate-remaining-useful-life-for-predictive-maintenance.html>.
- [3] **B. Gu, V. S. Sheng, K. Y. Tay, W. Romano, S. Li**, *Incremental support vector learning for ordinal regression*. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015;26(7):1403–16.
- [4] **R. Khelif, B. Chebel-Morello, S. Malinowski, E. Laajili, F. Fnaiech, N. Zerhouni**, *Direct remaining useful life estimation based on support vector regression*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2017;64(3):2276–85.
- [5] **L. Wang, L. Zhang, X. Wang X**, *Reliability estimation and remaining useful lifetime prediction for bearing based on proportional hazard model*. Journal of Central South University 2015;22(12):4625–33.
- [6] **B. Y. Yang, R. N. Liu, E. Zio**, *Remaining useful life prediction based on a double-convolutional neural network architecture*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2019;66(12):9521–30.
- [7] **J. C. Chen, T. L. Chen, W. J. Liu, C. C. Cheng, M. G. Li**, *Combining empirical mode decomposition and deep recurrent neural networks for predictive maintenance of lithium-ion battery*. Advanced Engineering Informatics 2021;50:101405.
- [8] **Y. Z. Wang, Y. L. Ni, S. Lu, J. G. Wang, X. Y. Zhang**, *Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries using support vector regression optimized by artificial bee colony*. IEEE Trans. Veh. Technol. 2019; 68(10): 9543–53.
- [9] **J. Y. Xu, A. G. Zhen, Z. D. Cai, P. L. Wang, K. D. Gao, D. M. Jiang**, *State of health diagnosis and remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on multi-feature data and mechanism fusion*. IEEE Access 2021;9:85431–41.
- [10] **A. Saxena, K. Goebel, D. Simon, N. Eklund**, *Damage propagation modeling for air-craft engine run-to-failure simulation*. In: Proceedings of International Conference on Prognostics and Health Management; 2008. p. 1–9 .
- [11] **D. Frederick, J. DeCastro, J. Litt**, *User's Guide for the Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation (CMAPSS)*, NASA/ARL, Technical Manual TM2007-215026, 2007.

# **NOWE WYMAGANIA ZASADNICZE DLA ŚRODKÓW OCHRONY INDYWIDUALNEJ – ROZPORZĄDZENIE NOWEGO PODEJŚCIA**

## **1. WPROWADZENIE**

Podmiotem ochrony w systemie ochrony pracy jest człowiek i jego zdrowie. Ochrona pracy człowieka jest zagwarantowana prawnie. W szerokim rozumieniu gwarancji prawnych zawierają się treści wszystkich norm prawa pracy ustanowionych w interesie pracujących i służących ochronie tych interesów. W tym obszarze mieści się także część zapisów prawa pracy, które służą bezpośrednio celom ochrony zdrowia pracowników przed zagrożeniami, jakie mogą generować procesy pracy. W polskim ustawodawstwie prawnym cele te formułują przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy. Zostały one określone w ustawie Kodeks pracy i innych ustawach oraz rozporządzeniach. Polskie ustawodawstwo prawne w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy jest zharmonizowane z legislacją prawną państw członkowskich Unii Europejskiej.

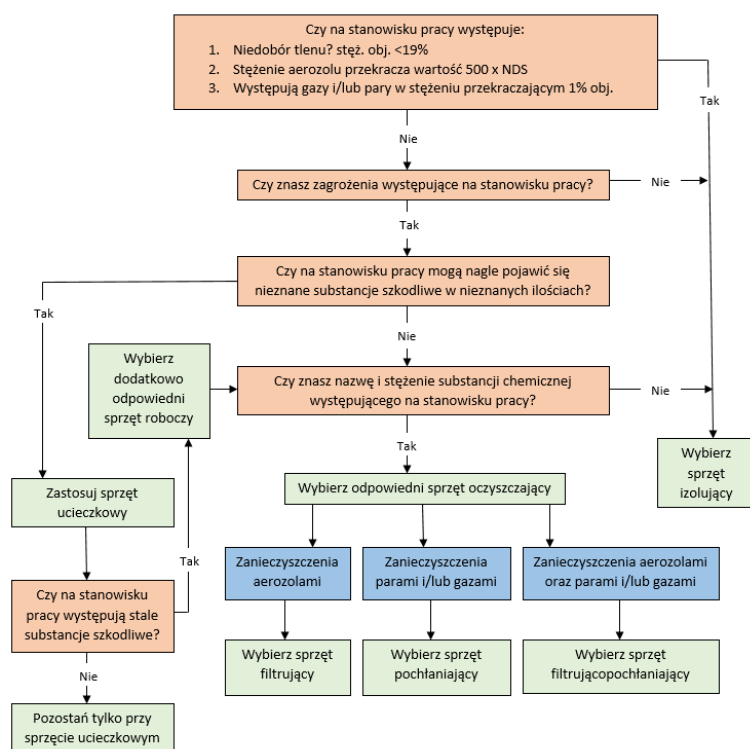
Zakres przedmiotowy przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy jest bardzo szeroki i dotyczy między innymi zagrożeń związanych z obiektami i pomieszczeniami pracy, użytkowaniem maszyn, urządzeń i narzędzi, procesami pracy szczególnie niebezpiecznymi i szkodliwymi, organizacji pracy, zagrożeń tkwiących w samych pracownikach, w ich właściwościach psychofizycznych, stanie zdrowia, kwalifikacjach. Przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy stanowią więc podstawowy zbiór norm ochrony pracy [8]. Nakładają one na pracodawców obowiązki z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy, w tym zaopatrzenia pracowników w stosowne środki ochrony indywidualnej oraz odzież i obuwie robocze w trakcie procesów pracy. A są to obowiązki szczególne, wynikają bowiem z kluczowych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy, które mają charakter prawa bezwzględnie obowiązującego.

## **2. ŚRODKI OCHRONY INDYWIDUALNEJ**

Środki ochrony indywidualnej, funkcjonujące w zakładowym systemie ochrony pracy, pozwalają często na całkowitą likwidację niebezpieczeństwa wynikającego z zagrożenia, które powstało na skutek działania procesu technologicznego. Mogą też stanowić zabezpieczenie dodatkowe na wypadek wystąpienia zagrożenia pomimo prawidłowego działania systemu zabezpieczeń oraz ochrony zbiorowej. Jeśli środki ochrony są traktowane jako jedyna ochrona pracownika, działająca w oderwaniu od całego systemu to mogą one co

najwyżej obniżyć poziom występującego zagrożenia, ale nie zawsze są w stanie zapewnić skuteczną ochronę [11].

Powyższe rozważania ilustruje przykładowy schemat postępowania dla doboru środków ochrony indywidualnej na przykładzie występujących zagrożeń układu oddechowego i jego ochrony (patrz rysunek 1.).



Rys. 1. Algorytm doboru odpowiedniego rodzaju sprzętu ochrony układu oddechowego [5]

Warunkiem podstawowym prawidłowego funkcjonowania środków ochrony indywidualnej w ramach zakładowego systemu ochrony pracy są:

- właściwe rozpoznanie czynników szkodliwych oraz uciążliwych,
- właściwy i kompletny dobór ŚOI,
- szkolenie pracowników w zakresie użytkowania wydanych środków oraz ich parametrów ochronnych,
- ciągle monitorowanie zagrożeń.

W pełni skuteczna ochrona pracowników jest możliwa jedynie w ciągłym procesie zarządzania bezpieczeństwem, a środki ochrony indywidualnej są jednym z elementów zintegrowanego systemu zarządzania bhp i ryzykiem zawodowym [1].

### **3. OBOWIĄZEK PRACODAWCY W ZAKRESIE ZAPEWNIENIA PRACOWNIKOM BEZPIECZNYCH WARUNKÓW PRACY**

Obowiązek pracodawcy zapewnienia pracownikom bezpiecznych i higienicznych warunków pracy został określony w art. 15 Kodeksu pracy jako podstawowa imperatywa prawa pracy [3].

W zakładzie pracy – przedsiębiorstwie, to pracodawca jest odpowiedzialny za stan bezpieczeństwa i higieny pracy swoich pracowników. Jest on zobowiązany spełnić obowiązki w zakresie BHP zarówno wobec pracowników zatrudnionych na podstawie stosunku pracy, jak i na podstawie umów cywilnoprawnych (umowa zlecenie, umowa o dzieło), a także osób, które w tym zakładzie pracy wykonują działalność gospodarczą na własny rachunek [12]. Pracodawca ma obowiązek zapewnienia bezpieczeństwa, ochrony zdrowia i życia również osobom, które nie świadczą pracy a przebywają na terenie zakładu pracy, np. organy kontrolne.

Zgodnie z przepisami Kodeksu pracy pracodawca ma obowiązek chronić zdrowie i życie pracowników przez zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki. W szczególności pracodawca jest obowiązany:

- 1) organizować pracę w sposób zapewniający bezpieczne i higieniczne warunki pracy;
- 2) zapewniać przestrzeganie w zakładzie pracy przepisów oraz zasad bezpieczeństwa i higieny pracy, wydawać polecenia usunięcia uchybień w tym zakresie oraz kontrolować wykonanie tych poleceń;
- 3) reagować na potrzeby w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa i higieny pracy oraz dostosowywać środki podejmowane w celu doskonalenia istniejącego poziomu ochrony zdrowia i życia pracowników, biorąc pod uwagę zmieniające się warunki wykonywania pracy;
- 4) zapewnić rozwój spójnej polityki zapobiegającej wypadkom przy pracy i chorobom zawodowym uwzględniającej zagadnienia techniczne, organizację pracy, warunki pracy, stosunki społeczne oraz wpływ czynników środowiska pracy;
- 5) uwzględniać ochronę zdrowia młodocianych, pracownic w ciąży lub karmiących dziecko piersią oraz pracowników niepełnosprawnych w ramach podejmowanych działań profilaktycznych;
- 6) zapewniać wykonanie nakazów, wystąpień, decyzji i zarządzeń wydawanych przez organy nadzoru nad warunkami pracy;
- 7) zapewniać wykonanie zaleceń społecznego inspektora pracy [4].

#### **3.1. Obowiązki pracodawcy związane z zapewnieniem pracownikom środków ochrony indywidualnej**

Obowiązek dostarczenia pracownikom środków ochrony indywidualnej jest określony w rozdziale IX działu XX ustawy z dnia 26 czerwca 1974 r. - Kodeks pracy (tekst jedn.: Dz. U. z 2019 r. poz. 1040 z późn. zm.). Zgodnie z art. 237<sup>6</sup> - 237<sup>10</sup> Kodeksu pracy pracodawca jest obowiązany dostarczyć pracownikowi środki ochrony indywidualnej zabezpieczające

przed działaniem niebezpiecznych i szkodliwych dla zdrowia czynników występujących w środowisku pracy oraz informować go o sposobach posługiwania się tymi środkami. Środki te powinny spełniać wymagania dotyczące oceny zgodności określone w odrębnych przepisach [14].

Środki ochrony indywidualnej powinny być stosowane w sytuacjach, kiedy nie można uniknąć zagrożeń lub nie można ich wystarczająco ograniczyć za pomocą środków ochrony zbiorowej lub odpowiedniej organizacji pracy [1].

Dostarczane pracownikom do stosowania środki ochrony indywidualnej powinny:

- 1) być odpowiednie do istniejącego zagrożenia i nie powodować same z siebie zwiększonego zagrożenia;
- 2) uwzględniać warunki istniejące w danym miejscu pracy;
- 3) uwzględniać wymagania ergonomii oraz stan zdrowia pracownika;
- 4) być odpowiednio dopasowane do użytkownika - po wykonaniu niezbędnych regulacji [14].

Ponadto należy tutaj uwzględnić, zgodnie z art. 237<sup>9</sup> Kodeksu pracy, że pracodawca nie może dopuścić pracownika do pracy bez środków ochrony indywidualnej oraz odzieży i obuwia roboczego, przewidzianych do stosowania na danym stanowisku pracy.

### **3.2. Wymagania dla środków ochrony indywidualnej wynikające z dyrektyw europejskich**

Dyrektywa jest aktem prawnym przewidzianym w Traktacie o Unii Europejskiej. Jest wiążąca w całości i zobowiązuje państwa członkowskie do dokonania jej transpozycji do prawa krajowego w określonym terminie [16].

W art. 153 Traktatu o funkcjonowaniu Unii Europejskiej nadaje się UE uprawnienia do przyjmowania dyrektyw w dziedzinie bezpieczeństwa i zdrowia w miejscu pracy. Dyrektywa ramowa, mająca szeroki zakres zastosowania, oraz kolejne dyrektywy dotyczące szczegółowych aspektów bezpieczeństwa i zdrowia w miejscu pracy stanowią podstawę europejskiego ustawodawstwa w zakresie BHP.

Dokonując transpozycji dyrektyw UE do prawa krajowego, państwa członkowskie mogą przyjmować bardziej rygorystyczne przepisy dotyczące ochrony pracowników. Dlatego wymogi ustawodawcze w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny pracy mogą się różnić w zależności od państwa członkowskiego UE [16].

## **4. ŚRODKI OCHRONY INDYWIDUALNEJ WEDŁUG NOWEGO PODEJŚCIA**

### **4.1. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej**

Niniejsze rozporządzenie stosuje się w całości od dnia 21 kwietnia 2018 r. Ustanawia ono wymagania w zakresie projektowania i produkcji środków ochrony indywidualnej (zwanych dalej „ŚOI”), które mają być udostępniane na rynku, w celu zapewnienia ochrony

zdrowia i bezpieczeństwa użytkowników, a także ustanowienia zasad dotyczących swobodnego przepływu ŚOI w Unii Europejskiej.

Jednym z najważniejszych priorytetów Unii (Wspólnoty Europejskiej) było i jest stworzenie wspólnego rynku oraz umożliwienie swobodnego przepływu towarów (a także kapitału, pracowników i usług) pomiędzy państwami członkowskimi [6].

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 (z ang. PPE - Personal Protective Equipment) w sprawie ujednoczenia przepisów prawnych państw członkowskich UE w zakresie Środków Ochrony Indywidualnej – z poprawkami wprowadzonymi zgodnie z zaleceniami zawartymi we wcześniej wydanych dyrektywach 93/68/EWG, 93/95/EWG oraz 96/58/WE, określa:

- wymagania zasadnicze, jakie powinny spełniać środki ochrony indywidualnej,
- procedury oceny zgodności środków ochrony indywidualnej,
- znakowanie środków ochrony indywidualnej,
- wymagania w zakresie nadzoru rynku środków ochrony indywidualnej wprowadzonych do obrotu handlowego [7].

Oznacza to, że środki ochrony indywidualnej mogą zostać wprowadzone na rynek Unii Europejskiej wyłącznie po spełnieniu wszystkich wymagań określonych w rozporządzeniu. Jeżeli środek ochrony indywidualnej posiada oznaczenie CE oraz ocenę zgodności UE, może zostać bez przeszkód wprowadzony na rynek każdego z państw członkowskich UE. Uprawnienie to nie ma jednak bezwzględniego charakteru; odpowiednie władze państw członkowskich mają prawo i obowiązek nie dopuścić do obrotu wyrobu, który może okazać się niebezpieczny [2].

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG w swojej treści precyzuje następujące kwestie [9]:

- wymagania dla producentów,
- wymagania dla upoważnionych przedstawicieli (artykuł 9),
- wymagania dla importerów (artykuł 10),
- wymagania dla dystrybutorów (artykuł 11),
- domniemanie zgodności ŚOI (artykuł 14),
- zawartość deklaracji zgodności dla ŚOI (artykuł 15 + załącznik IX),
- ogólne zasady dotyczące oznakowania CE (artykuł 16),
- zasady i warunki umieszczania oznakowania CE (artykuł 17),
- kategoryzacja środków ochrony indywidualnej (artykuł 18),
- procedury oceny zgodności (artykuł 19 + załączniki IV-XIII),
- zasadnicze wymagania dotyczące zdrowia i bezpieczeństwa (załącznik II),
- zawartość dokumentacji technicznej ŚOI (załącznik III).

## 4.2. Definicja Nowego Podejścia i Podejścia Globalnego

Usunięcie barier ograniczających swobodny przepływ towarów było głównym celem Traktatu Rzymskiego o utworzeniu Unii Europejskiej. Aby przybliżyć realizację tego celu dokonano zmian w traktacie, tworząc pojęcie Nowego Podejścia. Zmieniło ono charakter



dyrektyw technicznych, służących ujednoczeniu przepisów prawnych państw członkowskich [7].

*Nowe Podejście* oznacza, że dyrektywy służące ujednoczeniu prawodawstwa w państwach członkowskich obejmują duże grupy towarów i określają wymagania zasadnicze, jakie mają spełnić wyroby, aby korzystać z prawa do swobodnego przepływu na obszarze Unii Europejskiej. Konkretnie specyfikacje techniczne wyrobów spełniających wymagania zasadnicze są określone w normach zharmonizowanych. Stosowanie norm zharmonizowanych jest co do zasady dobrowolne, ale wyroby wytworzone zgodnie z tymi normami korzystają z domniemania zgodności z wymaganiami zasadniczymi.

Natomiast *Globalne Podejście* ma służyć ujednoczeniu praktyki oceny zgodności na obszarze Unii Europejskiej poprzez zagwarantowanie, że badania, procedury certyfikacji oraz jednostki notyfikowane będą spełniały ujednoczone wymagania w zakresie organizacji, działania, bezstronności i kompetencji [7].

### 4.3. Wyroby podlegające nowemu rozporządzeniu

Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 PPE podlegają środki ochrony indywidualnej zdefiniowane w art. 3 pkt. 1 jako "środki zaprojektowane i wyprodukowane do noszenia lub trzymania przez osobę w celu ochrony przed jednym lub większą liczbą zagrożeń dla zdrowia lub bezpieczeństwa tej osoby" [9].

Każdy termin użyty w tej definicji jest istotny:

- Środki ochrony indywidualnej są „*przewidziane do noszenia*”, w sensie noszenia odzieży, okularów, ochronników słuchu lub szelek chroniących przed upadkiem z wysokości. W rzeczywistości, większość środków ochrony indywidualnej to odzież, ochrony głowy, rękawice czy obuwie. Pozostałe środki ochrony indywidualnej, takie jak środki chroniące oczy i twarz w trakcie spawania (tarcze spawalnicze), przewidziane są do „trzymania” w dłoni. Ochrona zapewniona przez środki ochrony indywidualnej zależy od przewidywanych czynności, które wykonuje osoba narażona na zagrożenie: ubieranie lub trzymanie wyposażenia.
- Środki ochrony indywidualnej są noszone lub trzymane „*przez osobę*”. To właśnie odróżnia środki ochrony indywidualnej od środków ochrony zbiorowej. W szczególności terminy użyte w definicji ŚOI sytuują je w szeroko rozumianym zakresie ochrony ludzi. Termin „środki ochrony indywidualnej” nie ogranicza się do sprzętu używanego ogólnie przez pracowników, lecz dotyczy zastosowań niezwiązanych z pracą, takich jak sport czy rekreacja. Okulary przeciwsłoneczne, kaski ochronne używane podczas jazdy konnej lub na rowerze, rękawice do pracy w ogrodzie, ochraniacze piłkarskie, szelki do wspinaczki górskiej – to wszystko środki ochrony indywidualnej.
- Środki ochrony indywidualnej używane są „*w celu ochrony*” człowieka. Zazwyczaj sprzęt tworzy osłonę pomiędzy częścią ciała a zagrożeniem w celu ochrony przed wszelkim zagrożeniem: skórzana osłona chroniąca przed chropowatymi powierzchniami, które mogą skaleczyć skórę dłoni, osłona z filtrującego szkła chroniąca przed promieniowaniem, które może uszkodzić oczy, ołowiowa osłona chroniąca przed promieniami rentgenowskimi, które mogą uszkodzić komórki ciała, itd. Zabezpieczające funkcje środków ochrony indywidualnej są

dotatkowo podkreślone za pomocą piktogramów ustalonych w normach dotyczących ŚOI. Mają one symbolizować ochronę przed różnymi zagrożeniami: symbol przedstawiający zagrożenie pokazany jest wewnątrz osłony.

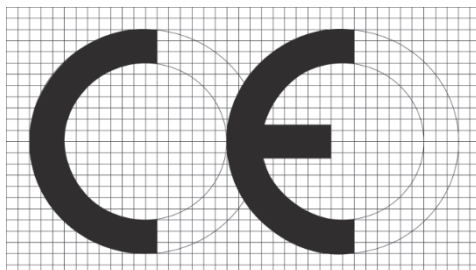
- Środki ochrony indywidualnej chronią przed „jednym lub wieloma zagrożeniami”. Ryzyko zazwyczaj definiuje się jako połączenie dwóch elementów: zagrożenia, które jest zjawiskiem, w wyniku którego może nastąpić uszkodzenie ciała lub zmiany chorobowe, oraz prawdopodobieństwa narażenia osoby na to zagrożenie. Ponieważ środki ochrony indywidualnej są zaprojektowane, aby chronić przed zagrożeniem, powinny zapobiegać wystąpieniu uszkodzenia ciała lub choroby. Konsekwentnie: w przypadku jednoczesnego narażenia na wiele rodzajów zagrożeń środki ochrony indywidualnej powinny chronić przed każdym z tych zagrożeń [19].

Rozporządzenie PPE ma również zastosowanie do:

- zespołów stanowiących połączenie dwu lub większej liczby urządzeń w integralną całość, zaprojektowanych z myślą o jednoczesnym zabezpieczeniu przed kilkoma zagrożeniami (np. kask ochronny połączony z ekranem chroniącym twarz);
- urządzeń ochronnych połączonych z wyposażeniem indywidualnym innego typu (np. kask ochronny połączony z lampą);
- wymiennych składników środków ochrony indywidualnej stosowanych zamiennie z innymi, niezbędnymi dla prawidłowego funkcjonowania tych środków i stosowanych wyłącznie jako komponenty danego zestawu (np. wymienne wkłady filtru w sprężcie do ochrony dróg oddechowych);
- układów (podzespołów) stosowanych łącznie ze środkami ochrony indywidualnej w celu połączenia tych środków z urządzeniami zewnętrznymi, także takich, które nie są przewidziane do noszenia lub trzymania przez użytkownika przez cały okres narażenia na zagrożenia (np. izolacyjny przewód powietrza do sprzętu chroniącego drogi oddechowe czy ściągacz linowy wraz ze złączkami, do łączenia sprzętu zapobiegającego upadkom z wysokości z punktem zamocowania) [2].

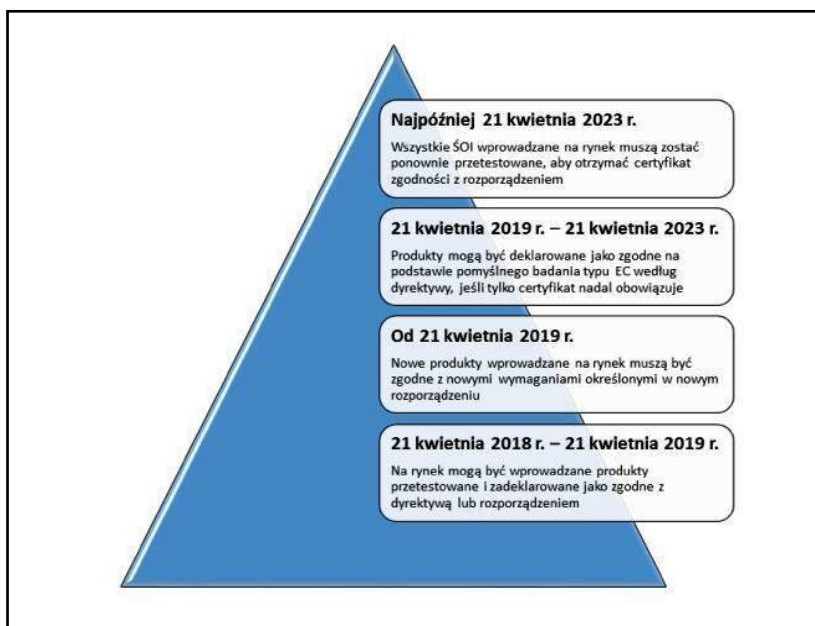
Dla ŚOI przewiduje się nadawanie przez producentów oznaczenia CE oraz oceny zgodności wyrobu UE. Wzór oznakowania zgodności CE obrazuje rysunek 2.

Dla producentów środków ochrony indywidualnej oznacza to, że wprowadzenie do obrotu środków ochrony indywidualnej zgodnie ze starą dyrektywą PPE 89/686/EWG nie jest już możliwe. Możliwe jest wprowadzenie do obrotu tylko środków ochrony indywidualnej posiadających deklarację zgodności opartą o nowe rozporządzenie 2016/425. W przypadku istniejących produktów, przetestowanych i zadeklarowanych zgodnie ze starą dyrektywą, przed upływem terminu istniejącego certyfikatu należało przeprowadzić ponowne testy i certyfikację. Wymagana data ponownej certyfikacji upłynęła w dniu 21 kwietnia 2023 r.



Rys. 2. Wzór oznakowania zgodności CE [10]

Na rysunku 3. przedstawiono okresy przejściowe dla produktów wprowadzanych do obrotu zgodnie z nowymi przepisami Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 PPE. Zostały tu określone kluczowe daty, których powinni być świadomi wszyscy operatorzy łańcucha dostaw i osoby odpowiedzialne za zarządzanie bezpieczeństwem pracy w organizacjach.



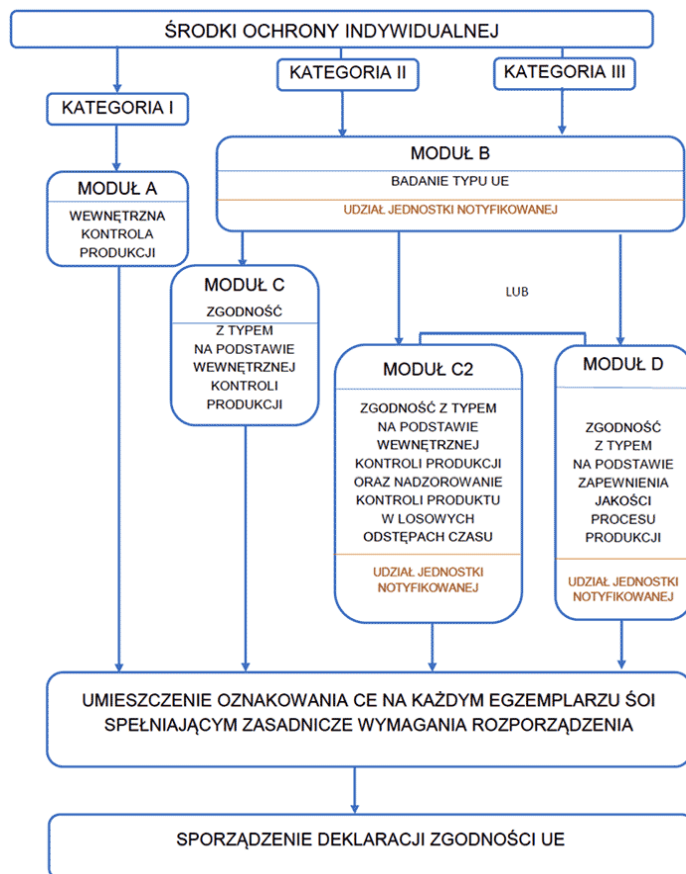
Rys. 3. Ramy czasowe przejścia z dyrektywy 89/686/EWG na wymagania Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady 2016/425 [15]

W odniesieniu do oceny zgodności UE producent jest zobowiązany wdrażać odpowiednie procedury jej oceny. Stosowane są one w odniesieniu do produkowanych środków ochrony indywidualnej przed ich wprowadzeniem do obrotu na rynku unijnym. Producent określa, do której kategorii zagrożeń należą produkowane przez niego środki

ochrony indywidualnej. Informacje o kategorii zagrożeń w odniesieniu do środków ochrony indywidualnej są zawarte w Załączniku I do Rozporządzenia (UE) 2016/425, w którym znajdują się odwołania do trzech następujących kategorii:

- kategoria I obejmuje wyłącznie zagrożenia minimalne,
- kategoria II obejmuje zagrożenia inne niż wymienione w kategoriach I i III,
- kategoria III obejmuje wyłącznie zagrożenia, które mogą mieć bardzo poważne konsekwencje, takie jak śmierć lub nieodwracalne szkody na zdrowiu użytkownika.

Procedury oceny zgodności środków ochrony indywidualnej według rozporządzenia (UE) nr 2016/425 obrazuje rysunek 4.



Rys. 4. Procedury oceny zgodności środków ochrony indywidualnej według rozporządzenia (UE) nr 2016/425 [13]

Rodzaje procedur oceny zgodności stosowanych w odniesieniu do środków ochrony indywidualnej:

1. Wewnętrzna kontrola produkcji według modułu A.
2. Badanie typu UE według modułu B.
3. Zgodność z typem na podstawie wewnętrznej kontroli produkcji według modułu C.
4. Zgodność z typem na podstawie wewnętrznej kontroli produkcji oraz nadzorowanej kontroli produktów w losowych odstępach czasu według modułu C2.
5. Zgodność z typem na podstawie zapewnienia jakości procesu produkcji według modułu D.

Poszczególne procedury oceny zgodności są opisane w Załącznikach IV – VIII rozporządzenia.

#### 4.4. Klasyfikacja środków ochrony indywidualnej

W Dyrektywie 89/686/EWG dotyczącej minimalnych wymagań stawianych środkom ochrony indywidualnej wprowadzono inny podział tych środków, niż przedstawiony w Polskiej Normie. Zgodnie z tą dyrektywą środki ochrony indywidualnej zostały podzielone na trzy kategorie, pod względem ryzyka przed którym chronią. Podział ten został podyktowany koniecznością zróżnicowania procedur certyfikacji środków ochrony indywidualnej.

Każdy środek ochrony indywidualnej, który podlega dyrektywie musi być poddany odpowiedniej procedurze oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy (w szczególności z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia). Procedura ta zależy od kategorii, do której zalicza się dany środek ochrony indywidualnej [1]. Wyróżniono trzy kategorie środków ochrony indywidualnej w zależności od poziomu ryzyka przy pracy i odpowiadające im procedury oceny zgodności z zasadniczymi wymaganiami [2, 18].

##### *Kategoria I*

Środki ochrony indywidualnej o prostej konstrukcji, zabezpieczające przed działaniem czynników minimalnego ryzyka. Kategoria obejmuje wyłącznie środki ochrony indywidualnej przeznaczone do zabezpieczenia użytkownika przed:

- działaniami czynników mechanicznych, których skutki są powierzchniowe (rękawice ogrodnicze, napastrki itp.),
- środkami czyszczącymi słabego działania i o łatwo odwracalnych skutkach działania (rękawiczki ochronne przeciwko rozcieńczonym roztworom detergentów itp.),
- zagrożeniami związanymi z manipulacją gorącymi przedmiotami, która nie naraża użytkownika na temperaturę wyższą niż 50°C lub też na niebezpieczne uderzenia (rękawice, fartuchy itp.),
- czynnikami atmosferycznymi, które nie mają charakteru czynników wyjątkowych i ekstremalnych (nakrycia głowy, odzież sezonowa, obuwie itp.),
- słabymi uderzeniami i drganiem, których skutki nie mogą spowodować nieodwracalnych uszkodzeń ciała (lekkie hełmy osłaniające włosy, rękawice, lekkie obuwie itp.), światłem słonecznym (okulary słoneczne).

### *Kategoria II*

Wszystkie środki ochrony indywidualnej nie objęte kategorią I i III - średni poziom ryzyka (przykładowo: ochronniki słuchu, hełmy sportowe).

### *Kategoria III*

Środki ochrony indywidualnej o złożonej konstrukcji, z przeznaczeniem do ochrony przed zagrożeniem życia lub poważnymi i nieodwracalnymi uszkodzeniami zdrowia. Kategoria ta obejmuje wyłącznie:

- sprzęt ochronny układu oddechowego chroniący przed stałymi lub ciekłymi aerozolami bądź też gazami drażniącymi, niebezpiecznymi, toksycznymi lub promieniotwórczymi,
- sprzęt ochronny układu oddechowego zapewniający pełną izolację atmosfery, łącznie z używanym przy nurkowaniu,
- środki ochrony indywidualnej zapewniające ograniczoną ochronę przed zagrożeniami chemicznymi lub promieniowaniem jonizującym,
- sprzęt ratowniczy do użytku w środowiskach z wysoką temperaturą, których skutki są porównywalne do działania środowiska z temperaturą powietrza 100°C lub wyższą i w których może lub nie może występować promieniowanie podczerwone, płomień lub narażenie na duże rozpryski roztopionego materiału,
- wyposażenie ratownicze do użytku w środowiskach z niską temperaturą, których skutki są porównywalne do działania środowiska z temperaturą powietrza -50°C lub niższą,
- środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkami z wysokości,
- środki ochrony indywidualnej chroniące przed zagrożeniami elektrycznymi, niebezpiecznym napięciem prądu elektrycznego lub też używane jako izolatory przy pracy z wysokim napięciem.

Najmniej skomplikowana procedura dotyczy kategorii I. W tym przypadku producent powinien spełnić zasadnicze wymagania odnoszące się do jego wyrobu, a następnie wystawić deklarację zgodności WE. W deklaracji producent deklaruje zgodność wyrobu z dyrektywą na swoją wyłączną odpowiedzialność. Żadna jednostka notyfikowana nie bierze w tej procedurze udziału. Producent może deklarować spełnienie norm zharmonizowanych, które dają domniemanie zgodności z zasadniczymi wymaganiami, nie jest to jednak obowiązkowe. Ponadto producent sporządza dokumentację techniczną oraz umieszcza na wyrobie oznaczenie CE.

W przypadku, gdy środek ochrony indywidualnej zalicza się do kategorii II, sama deklaracja zgodności nie wystarczy. Wyrób musi zostać poddany badaniu typu WE przeprowadzonemu przez jednostkę notyfikowaną. Po uzyskaniu certyfikatu badania typu producent wystawia deklarację zgodności WE, w której deklaruje zgodność produkowanych seryjnie wyrobów z zatwierdzonym w badaniu modelem. Tak jak w przypadku obu pozostałych kategorii, producent przygotowuje dokumentację techniczną. Na koniec umieszcza na wyrobie oznaczenie CE.

Środki ochrony indywidualnej należące do kategorii III również poddaje się badaniu typu WE, ale do potwierdzenia zgodności ich seryjnej produkcji z zatwierdzonym w badaniu modelem nie wystarczy deklaracja zgodności wystawiona przez producenta. Konieczny jest udział jednostki notyfikowanej również na etapie produkcji. Są tu przewidziane dwie procedury:

- kontrola jakości wyrobu finalnego,

- system zapewnienia jakości produkcji.

Wybór jednej z dwóch powyższych procedur należy do producenta. Również i w tym przypadku producent przygotowuje dokumentację techniczną, wystawia deklarację zgodności i umieszcza na wyrobie oznaczenie CE.

#### 4.5. Normy zharmonizowane a środki ochrony indywidualnej

Normy zharmonizowane są to europejskie normy techniczne, opracowane i ustanowione przez jedną z europejskich organizacji normalizacyjnych (CEN, CENELEC lub ETSI) na podstawie zlecenia, tzw. mandatu, wydanego przez Komisję Europejską [17].

Normy zharmonizowane ustanawia się dla każdej z dyrektyw Nowego Podejścia. Decyzja wykonawcza Komisji (UE) 2020/668 z dnia 18 maja 2020 r. w sprawie norm zharmonizowanych dotyczących środków ochrony indywidualnej, opracowanych na potrzeby Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 PPE, stanowią uszczegółowienie i rozwinięcie zasadniczych wymagań dla tych środków. Zawierają one specyfikacje techniczne dotyczące projektowania środków ochrony indywidualnej oraz metody ich badań.

Wyprodukowanie wyrobu zgodnie z normą zharmonizowaną daje domniemanie zgodności z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy europejskiej pod warunkiem, że:

- symbol tej normy został opublikowany w Dzienniku Urzędowym Wspólnoty Europejskiej w wykazie norm związanych z tą dyrektywą,
- norma ta została objęta harmonizacją z normami krajowymi przynajmniej jednego państwa członkowskiego Unii Europejskiej.

Domniemanie zgodności dotyczy tylko tych zasadniczych wymagań, które objęte są daną normą zharmonizowaną. Zastosowanie norm zharmonizowanych, które dają domniemanie zgodności jest dobrowolne. Jeśli jednak producent zdecyduje się na niestosowanie norm zharmonizowanych, powinien innymi środkami wykazać zgodność wyrobu z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy lub rozporządzenia [17].

#### 4.6. Wyroby wyłączone ze środków ochrony indywidualnej

Z zakresu obowiązywania omawianego rozporządzenia w sprawie środków ochrony indywidualnej wyłączonych jest pięć grup środków ochrony indywidualnej wymienionych w Załączniku I:

1. Środki ochrony indywidualnej zaprojektowane i wykonane specjalnie do użytku przez siły zbrojne lub w celu utrzymania prawa i porządku publicznego (hełmy, tarcze, itp.).
2. Środki ochrony indywidualnej do celów samoobrony (pojemniki aerozolowe, osobista broń odstrasząca itp.).
3. Środki ochrony indywidualnej zaprojektowane i wykonane do użytku prywatnego zapewniające ochronę przed:
  - niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi (nakrycia głowy, odzież przeciwdeszczowa, obuwie nieprzemakające, itp.),
  - wilgocią i wodą (rękawice do zmywania naczyń itp.),
  - ciepłem (rękawice termiczne, itp.).

4. Środki ochrony indywidualnej przeznaczone do ochrony i ratowania osób na statkach lub w samolotach, nie przeznaczone do stałego noszenia (zakładane w sytuacji zagrożenia).
5. Do ochrony głowy, twarzy lub oczu użytkowników przeznaczone dla kierowców i pasażerów motocykli i motorowerów.

## PODSUMOWANIE

Zakres przedmiotowy przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy jest bardzo szeroki i dotyczy między innymi zagrożeń związanych z obiektami i pomieszczeniami pracy, używaniem maszyn, urządzeń i narzędzi, szczególnie niebezpiecznymi procesami pracy, organizacji pracy, zagrożeń tkwiących w samych pracownikach, w ich właściwościach psychofizycznych, stanie zdrowia, itd. Jednocześnie nakładają one w sposób imperatywny na pracodawców obowiązek wyposażania pracowników w środki ochrony osobistej.

Uchylenie dyrektywy Rady 89/686/EWG i zastąpienie jej Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego (UE) 2016/425 w sprawie środków ochrony indywidualnej ma kluczowe znaczenie dla producentów, importerów oraz dystrybutorów środków ochrony indywidualnej, ale również dla pracodawców oraz pracowników służby bhp. Wprowadzone rozporządzenie nowego podejścia określa wymagania zasadnicze dla ŚOI i obowiązuje w całej unii europejskiej. Oznacza to, że środki ochrony indywidualnej mogą zostać wprowadzone na rynek Unii Europejskiej wyłącznie po spełnieniu wszystkich wymagań określonych w rozporządzeniu. Jeżeli środek ochrony indywidualnej posiada oznaczenie CE oraz ocenę zgodności UE, może zostać bez przeszkód wprowadzony na rynek każdego z państw członkowskich UE.

W tym miejscu, na zakończenie, zaakcentować należy, że w przypadku istniejących ŚOI, przetestowanych i zadeklarowanych zgodnie ze starą dyrektywą Rady 89/686/EWG, przed upływem terminu istniejącego certyfikatu należało przeprowadzić ponowne testy i certyfikację. Wymagana data ponownej certyfikacji upłynęła w dniu 21 kwietnia 2023 r.

## LITERATURA

- [1] **Bobaryko W., Rybakowski M.:** *Kompleksowe wyposażenie pracowników w środki ochrony indywidualnej dla skutecznego zabezpieczenia przed zagrożeniami w procesach pracy.* Aktualne trendy i badania w inżynierii: monografia naukowa, red. P. Bachman. T. 3/2022, Zielona Góra, Wydaw. Naukowe Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego 2022.
- [2] **Drgała-Puto M., Stefko A.:** *Procedury oceny zgodności ŚOI a obowiązki podmiotów gospodarczych wprowadzających wyroby na rynek.* [W:] CIOP – PIB. Bezpieczeństwo Pracy 6/2014.
- [3] **Kodeks pracy art. 15,** ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. (t.j. Dz. U. z 2016 r. poz. 1666, zm.: Dz. U. z 2009 r., Nr 56, poz.458).
- [4] **Kodeks pracy art. 207,** ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. (t.j. Dz. U. z 2016 r. poz. 1666, zm.: Dz. U. z 2009 r., Nr 56, poz.458).



- [5] **Majchrzycka K.:** *Środki ochrony układu oddechowego*. Warszawa 2012.
- [6] **Projekt Bliźniaczy PL2005/IB/EC-01:** *Dyrektywa środki ochrony indywidualnej 89/686/EWG*. Wyd. MG, Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości. Warszawa 2008. Dostęp w Internecie: <http://www.oznakowanie-ce.pl/dodatki/pobierz/124-dyrektywa-89-686-ewg-broszura.html> (data dostępu: 20.09.2022).
- [7] **Projekt Bliźniaczy PHARE PL0004.02:** *Wprowadzanie na rynek środków ochrony indywidualnej. Wskazówki dla producentów i dostawców*. Wyd. CIOP – PIB. Warszawa 2002. Dostęp w Internecie: <http://www.oznaczenie-ce.pl/przewodniki/pdf/wpro-na-ryn-sr.pdf> (data dostępu: 24.08.2022).
- [8] **Rączkowski B.:** *BHP w praktyce*. Wyd. ODDK Sp. z o.o., Gdańsk 2010.
- [9] **Rozporządzenie parlamentu europejskiego i rady (UE) 2016/425** z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej. L 81/51 z dnia 31.3.2016.
- [10] <https://www.amc.com.pl/aktualnosci/oznakowanie-ce-na-soi71.html> (data dostępu: 23.08.2022).
- [11] <http://archiwum.ciop.pl/1271.html> (data dostępu: 23.08.2022).
- [12] <http://poradnikprzedsiębiorcy.pl/-obowiazki-pracodawcy-w-zakresie-bhp> (data dostępu: 17.07.2023).
- [13] [http://www.ciop.pl/CIOPortalWAR/appmanager/ciop/pl?\\_nfpb=true&\\_pageLabel](http://www.ciop.pl/CIOPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel)
- [14] <http://www.bhp.abc.com.pl/czytaj/-/artykul/obowiazki-pracodawcy-zwiazane-z-zapewnieniem-pracownikom-odpowiednich-srodkow-ochrony-indywidualnej-oraz-odziezy-i-obuwia-roboczego> (data dostępu: 3.05.2022).
- [15] <https://industrialcatalogue.ansell.eu/pl/blog/nowe-rozporz-dzenia-nowe-obowi-zki>
- [16] <https://osha.europa.eu/pl/safety-and-health-legislation/european-directives> (data dostępu: 01.02.2023).
- [17] <https://www.pkn.pl/polskie-normy/normy-prawo-ue/normy-zharmonizowane> (data dostępu: 3.05.2022).
- [18] [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/personal-protective-equipment-ppe\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/personal-protective-equipment-ppe_en) (data dostępu: 09.01.2023).
- [19] [http://www.testbroker.pl/pl/zakres\\_oznakowania\\_ce/srodki\\_ochrony\\_osobiste](http://www.testbroker.pl/pl/zakres_oznakowania_ce/srodki_ochrony_osobiste) (data dostępu: 07.12.2022).

# BADANIA SYMULACYJNE PROCESÓW FORMOWANIA WYPRASEK Z TWORZYW SZTUCZNYCH

## 1. WPROWADZENIE

Wraz z postępującym zaawansowaniem technologicznym kolejne wersje komputerów oferowały coraz większą moc obliczeniową, a ich oprogramowanie oferowało coraz większe możliwości [3]. Dzięki wykorzystaniu urządzeń, wyposażonych w wyspecjalizowane oprogramowanie, czas projektowania, prototypowania, optymalizacji rozwiązań i ich testowania, a także czas sporządzania dokumentacji technicznej konstrukcji może zostać znacznie skrócony. Pozwala także na wczesne wykrycie potencjalnych błędów konstrukcyjnych, co bezpośrednio przekłada się na oszczędność czasu, materiału oraz narzędzi, a to pozytywnie wpływa na koszt całego procesu [1,2].

Na rynku wyspecjalizowanych systemów informatycznych spotkać można programy do symulacji mechaniki płynów oraz ciał stałych, symulacji i obliczeń wytrzymałościowych, symulacji procesu wtrysku materiału do formy i wiele innych. Technologie te stosuje się obecnie w procesach projektowania i wytwarzania praktycznie każdego przedmiotu otaczającego człowieka. Wszystkie urządzenia, w celu nadania im trwałości i w celu zapewnienia bezpieczeństwa ich użytkownikowi powinny zostać wyposażone w odpowiednio zaprojektowaną obudowę, gwarantującą integralność konstrukcji co najmniej do momentu zakończenia okresu ich używalności.

Najpopularniejszym materiałem wykorzystywanym do produkcji różnego rodzaju obudów urządzeń elektronicznych jest tworzywo sztuczne.

Swoją popularność tworzywa sztuczne zawdzięczają posiadaniu wielu pożądaných właściwości elektrycznych, tj. brak indukcyjności oraz obojętność elektryczna. Ponadto tam, gdzie nie jest oczekiwana bardzo wysoka trwałość i wytrzymałość mechaniczna, tworzywa sztuczne stanowią tańszą alternatywę. Proces obróbki tworzyw sztucznych jest znacznie mniej wymagający, chociażby ze względu na ich niższą średnią temperaturę topnienia od średniej temp. topnienia metali [4].

W ostatnich latach na rynku projektowym coraz większą popularnością cieszą się programy umożliwiające symulację procesu wtrysku tworzywa sztucznego do formy. Pozwalają one nie tylko ustalić optymalne parametry wtryskarki, ale także wykryć obszary modelu 3D, które mogą przyczynić się do powstawania defektów w wyprasce i wyróżnić je, przedstawiając graficznie rozmiar i obszar niedoskonałości w postaci siatki nałożonej na model 3D. Programy te umożliwiają symulacje i przeprowadzają skomplikowane

obliczenia. Stanowią tym samym rozbudowane systemy doradcze, pozwalające na uniknięcie kosztownych i czasochłonnych zmian w konstrukcji formy, a w skrajnych przypadkach pozwalają na uniknięcie konieczności wytworzenia formy od nowa [5].

W artykule przedstawiono proces budowy wyprasek i symulacji ich wytwarzania w procesie formowania wtryskowego

## 2. TWORZYWA SZTUCZNE I ICH PRZETWÓRSTWO

Pojęcie tworzywa sztucznego określa materiał użytkowy, którego podstawowym elementem budowy jest polimer. Polimerami nazywa się natomiast związki wielkocząsteczkowe, składające się z cyklicznie powtarzających się i związanych ze sobą atomów lub ich grup - merów.

Wśród polimerów wyróżnić można polimery naturalne, które występują w przyrodzie, które muszą jednak zostać przetworzone oraz polimery syntetyczne - otrzymywane w procesie przeprowadzenia syntezy chemicznej monomerów.

Ze względu na różnice w mechanizmie powstawania, syntezę polimerów można podzielić na trzy podstawowe typy reakcji:

- polimeryzacja - proces, którego produktem są wyłącznie makrocząsteczki – wydzielaniu nie ulegają żadne produkty uboczne. Powstanie polimeru następuje w wyniku przebiegającej łańcuchowo reakcji, która polega na łączeniu substratów, które reagując same ze sobą aż do wyczerpania wolnych monomerów tworzą cząsteczkę o większej masie,
- poliaddycja - reakcja o przebiegu stopniowym, podczas której wzrost łańcucha cząsteczek następuje bardzo szybko, zachodząca dzięki aktywacji przez katalizator lub inicjator reakcji. W wyniku reakcji nie następuje wydzielanie żadnego produktu ubocznego, a cząsteczki polimerów uzyskanych w jej wyniku wyróżniają się mogą dużym ciężarem, nawet w przypadku, gdy monomer uległ niewielkiemu przereagowaniu,
- polikondensacja - zachodząca pomiędzy substratami z reaktywnymi grupami funkcyjnymi tworząca pomiędzy nimi wiązania bez udziału inicjatora. Jej efektem jest powstanie związku wielkocząsteczkowego, któremu towarzyszy wydzielanie produktu ubocznego w postaci prostego związku chemicznego. Reakcja przebiega stopniowo i podobnie w jej trakcie stopniowemu powiększeniu ulega ciężar polimeru.

Większość właściwości mechanicznych oraz fizykochemicznych polimerów zależy od ich ciężaru cząsteczkowego. Im jest on większy tym większa jest wytrzymałość mechaniczna polimeru, lecz jednocześnie zwiększeniu ulega także lepkość jego stopu. Właściwość ta zachodzi do momentu osiągnięcia przez ciężar cząsteczkowy wartości granicznej, po osiągnięciu której dalszy wzrost nie powoduje już zmian właściwości polimeru [6].

Wśród wymagań stawianych wyrobom z tworzyw sztucznych, pozwalających na porównanie różnych materiałów znajdują się:

- niska masa,

- względnie wysoka wytrzymałość oraz elastyczność,
- możliwość uzyskania powierzchni o pożądanych właściwościach, bez konieczności stosowania dodatkowej obróbki,
- odporność na korozję i innego rodzaju degradacje spowodowane oddziaływaniem środowiska,
- możliwość uzyskania produktu w pożądanym kolorze bez konieczności nanoszenia dodatkowych powłok,
- łatwość dostosowania procesu do produkcji w większej skali,
- dobra obrabialność i przetwarzalność,
- możliwość manipulacji trwałością przedmiotu w szerokim zakresie, np. poprzez zastosowanie polimerów biodegradowalnych lub niebiodegradowalnych,
- możliwość recyklingu,
- możliwość uzyskania wysoce skomplikowanych i dokładnych kształtów wypraski, których uzyskanie z wykorzystaniem materiałów innego typu jest trudne lub niemożliwe.

Tworzywa sztuczne oprócz zalet, tak jak każdy materiał, posiadają także wady:

- niższa średnia wytrzymałość mechaniczna w porównaniu do metali,
- podatność na pęcznienie,
- mała sztywność,
- mała odporność cieplna,
- mała twardość,
- degradacja pod wpływem promieni UV.

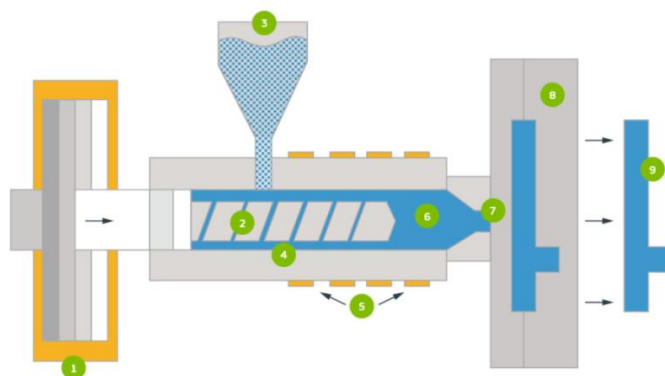
Warto zwrócić uwagę także na fakt, że materiały polimerowe stanowią grupę materiałów wykazujących własności lepko sprężyste. Ich właściwości fizyczne w znacznym stopniu zależne są od warunków zewnętrznych. Mogą przyjmować cechy ciała plastycznego, elastycznego, czy też kruchego w zależności od działających na ciało obciążeń czy temperatury oraz czasu ich działania. Niemalym problemem pozostaje wciąż także recykling zużytych tworzyw polimerowych oraz ich kompozytów.

W zależności od przeznaczenia produktu, materiał wykorzystany do jego produkcji musi posiadać szereg pożądanych cech, a jednocześnie być możliwie tani. Tworzywa sztuczne, znajdując się w grupie materiałów spełniających założone właściwości graniczne dla danego zastosowania, stanowią zazwyczaj bardzo korzystną ekonomicznie alternatywę.

Tworzywa polimerowe zanim zostaną ostatecznie przeobrażone w produkt, jako materiał dostarczane i magazynowane mogą występować w postaci granulatu, prochu, płatów, a nawet cieczy.

## **2.1. Formowanie wtryskowe tworzyw sztucznych**

Proces formowania wtryskowego wykorzystuje tworzywo sztuczne, które po wcześniejszym podgrzaniu, w stanie upłynnionym, pod dużym ciśnieniem przetłaczane jest do szczelnie zamkniętej formy, której przylegające powierzchnie dociskane są do siebie z bardzo dużą siłą, przeciwdziałającą sile napierającego materiału. Wszystko odbywa się za sprawą szeregu współpracujących elementów przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat formowania wtryskowego [7]

1- tłok, 2 ślimak, 3 lej, 4 cylinder, 5 grzałki, 6 materiał, 7 dysza, 8 forma, 9 wypraska.

Proces formowania wtryskowego umożliwia produkcję na dużą skalę oraz na osiągnięcie wyrobów o dużej dokładności i szczegółowości, które nie wymagają wykańczającej obróbki skrawaniem, jak np. w przypadku odkuwek i odlewów, a jednocześnie gwarantuje bardzo wysoką powtarzalność wyrobu.

## 2.2. Technologiczność projektowania wyprasek

Projektowanie wyrobów, których procesem wytwórczym ma być formowanie wtryskowe wymaga poświęcenia szczególnej uwagi ich technologiczności nie tylko ze względu na konieczność umożliwienia uwolnienia wypraski z formy, lecz także ze względu na występowanie ryzyka powstawania wad wypraski. Ich występowanie w dużej mierze uzależnione jest od parametrów wtrysku, jednak wprowadzenie odpowiednich zmian w geometrii wyrobu, obojętnych dla jego funkcjonalności może znacznie ułatwić przepływ materiału i prawidłowe wypełnienie formy.

Grubość ścian wyrobów z tworzyw sztucznych zależy w głównej mierze od ich przeznaczenia, kształtu, wymiarów, czy oczekiwanej sztywności i jest to zazwyczaj wielkość od 0,8 do 3 mm. Jest także powiązana z długością płynięcia materiału i dla wyrobów, których kształt wymusza pokonanie przez materiał dużej odległości, grubość ścianki powinna być odpowiednio większa. W celu redukcji długości płynięcia materiału w poszczególnych częściach formy wtryskowej zastosować można dodatkowy wlew. Powinien być on jednak umieszczony w obszarze niewidocznym wyrobu, ze względu na to, że każdy punkt wtrysku pozostawia wyraźny defekt na jego powierzchni.

Defekt ten może zostać zminimalizowany np. poprzez zastosowanie specjalnej dyszy gorąokanałowej z zaworem igłowym, lecz jest właściwie niemożliwy do całkowitego wyeliminowania, a ponadto rozwiązanie to jest wysoce kosztowne. Niezależnie od tego jaką grubość ścianki modelu przyjęto, zawsze powinno się dążyć do utrzymania stałej jej wielkości w przekroju. W celu uniknięcia nadmiernego nagromadzenia materiału wokół żeber

czy słupków, stosować można miejscowe wybrania materiału. Oprócz długości drogi płynięcia materiału, znaczenie ma także jej kształt. Przekrój wypraski powinien być pozbawiony nagłych zmian szerokości ścian oraz gwałtownych przewężeń, a tor poruszania się płynnego tworzywa powinien zmieniać się w sposób możliwie łagodny i jeśli to konieczne ulegać zmniejszeniu tylko podczas oddalania się od punktu wtrysku. Wypełnienie formy ułatwia także zwiększenie przekroju wypraski w pobliżu punktu wtrysku.

Należy dążyć także do tego, aby naprężenia wyprasek powodowane przez skurcz materiału występowały symetrycznie, gdyż mogą one powodować występowanie odkształceń i wypaczeń kształtu wyrobu. Skurcz w zależności od rodzaju zastosowanego materiału, a także rodzaju zastosowanych wypełnień może wykazywać różną wartość w kierunku wzdłużnym i poprzecznym do kierunku płynięcia materiału. Materiał w kierunku wzdłużnym do kierunku ułożenia włókien wykazuje większą podatność na skurcz, lecz charakteryzuje się większą wytrzymałością.

W celu zwiększenia sztywności i wytrzymałości wyrobu zamiast zwiększenia grubości ścian, stosuje się żebra wzmacniające, które także mogą ulegać wypaczeniu lub powodować miejscowe zapadnięcia powierzchni po przeciwnej stronie ściany, do której przylegają. Ogólnie przyjmuje się, że szerokość żeber nie powinna wynosić więcej niż 60% grubości ściany, z którą się łączą, a ich wysokość w celu zapewnienia odpowiedniej sztywności powinna stanowić co najmniej pięciokrotność ich grubości.

Należy jednak unikać tworzenia żeber niepotrzebnie wysokich, gdyż są one nietechnologiczne ze względu na utrudnienie wykonania formy, istnienie ryzyka ich niekompletnego wypełnienia materiałem oraz powstawania pułapek powietrznych.

Kolejną cechą wypraski decydującą o jej technologiczności są pochYLENIA powierzchni prostopadłych do kierunku otwierania formy. Stosuje się je w celu umożliwienia i ułatwienia uwolnienia wypraski z wnętrza narzędzia oraz uniknięcia zarysowań i przetarć jej powierzchni. Wymagana wartość kąta pochYLENIA zależy od zastosowanego materiału, wysokości i wielkości powierzchni wypraski, jednak przeważnie przyjmuje wartość od 0,5 do 2 stopni. Przy projektowaniu należy dążyć do tego, aby otwory nie były mniejsze niż 1 mm z uwagi na wrażliwość cienkich i długich rdzeni na uszkodzenia mechaniczne spowodowane przez strumień materiału wypełniającego formę. W przypadku otworów nieprzelotowych ich głębokość nie powinna być większa niż pięciokrotność ich średnicy.

W celu minimalizacji występowania karbu oraz ułatwienia przepływu tworzyw przez formę, w miejscach zmian przekroju, naroży i ostrych krawędzi należy stosować zaokrąglenia. W przypadku zaistnienia konieczności zapewnienia dużej dokładności wymiarowej wybranym cechom wypraski należy dążyć do tego, aby były otrzymane przez jedną z części formy. Linie podziału formy należy prowadzić wzdłuż krawędzi wypraski w celu ich maskowania oraz ułatwienia obróbki powstającego rąbka wtryskowego.

Choć nie w każdym przypadku wizualne wady wyrobu stanowią problem, ich występowanie często wiąże się z jednoczesnym pogorszeniem właściwości mechanicznych, dlatego stosowanie podstawowych zasad projektowania wyrobów z tworzyw sztucznych pożądanym jest niezależnie od przeznaczenia detalu. W niektórych przypadkach całkowite wyeliminowanie powstawania wad wypraski może nie być możliwe lub może wymagać nakładu pracy niewspółmiernego, do korzyści wynikających z posiadania wypraski

o geometrii zoptymalizowanej. W takiej sytuacji częściowym rozwiązaniem problemu jest przeniesienie obszaru występowania wady wypraski do miejsca niewidocznego lub nieistotnego ze względu na właściwości mechaniczne wyrobu. Pomimo, że konstruktor projektując wypraskę nie ma bezpośredniego wpływu na to, jak zostanie zaprojektowana forma i jak będzie wyglądała charakterystyka chłodzenia materiału, to poprzez nadanie wyprasce konkretnej geometrii, ogranicza on zakres dostępnych rozwiązań. Wpływając na kształt stempla i matrycy może uniemożliwić równomierne i odpowiednio szybkie chłodzenie wypraski. Kształt wypraski może powodować także powstawanie w niej wewnętrznych naprężeń własnych, ze względu na występowanie zjawisk zachodzących na poziomie cząsteczkowym, np. przez występowanie efektu ścinania materiału [7], czy orientacji ułożenia cząsteczek materiału. Przypadku wtryskiwania części urządzeń medycznych opisane problemy mają szczególne znaczenie, ze względu na to, że urządzenia te mają ogólnie nietypowe kształty, wąskie pola tolerancji oraz muszą spełniać wysokie standardy szczelności [8,9].

### **3. SYMULACJA PROCESU WTRYSKIWANIA TWORZYW TERMOPLASTYCZNYCH**

Przeprowadzanie symulacji komputerowych stało się jednym z podstawowych narzędzi, służących rozwiązywaniu zagadnień natury technicznej. Programy symulujące proces wtryskiwania tworzyw sztucznych służą do reologicznej i termicznej analizy zachowania materiału oraz zjawisk zachodzących w trakcie wypełniania wnęki formy o kształcie wcześniej przygotowanego, numerycznego modelu wypraski. Oprogramowanie powstało z myślą o konstruktorach, projektujących wypraski z tworzyw sztucznych oraz formy wtryskowe, a także o technologach [10]. Do najistotniejszych korzyści wynikających z jego implementacji w procesie wytwarzania z udziałem formowania wtryskowego tworzyw sztucznych zaliczyć można:

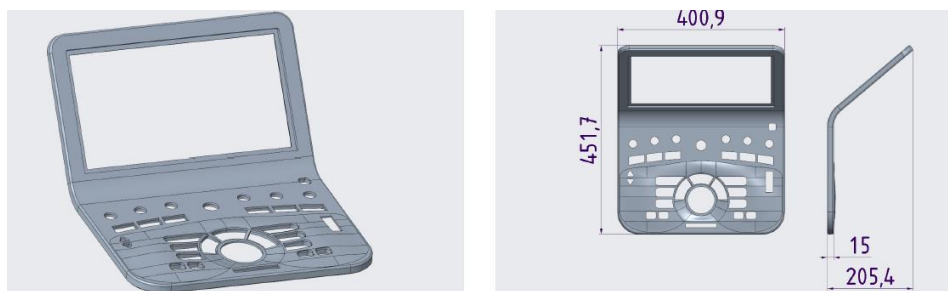
- zmniejszenie ilości fizycznych prototypów,
- zmniejszenie zużycia materiału, dzięki optymalizacji geometrii wyrobu,
- skrócenie czasu przygotowania procesu związanego z odpowiednim doбором jego parametrów,
- zmniejszenie czasu trwania cyklu, np. poprzez skrócenie faz chłodzenia i grzania formy,
- zmniejszenie wymaganej siły domknięcia formy,
- wykrycie potencjalnych problemów w geometrii wypraski i możliwość dokonania ich korekty na wczesnym etapie, gdy forma nie została jeszcze wykonana,
- uproszczenie procesu doboru właściwego materiału wypraski,
- podniesienie jakości wyrobu, dzięki weryfikacji skurczu materiału i możliwości precyzyjnej jego kompensacji.

Programy tego rodzaju są obecnie tak rozbudowane, że w zależności od posiadanych danych wejściowych możemy uzyskać interesujące nas informacje. Program Autodesk Moldflow nie tylko pozwala na wykrycie i wskazanie wad konstrukcyjnych wypraski,

generować może także podpowiedzi dotyczące wydajności układu chłodzenia formy wtryskowej, kanałów doprowadzających, czy też znajdować optymalne położenie punktu wtrysku. Program jest w stanie obliczyć czas cyklu, wypełnienia i chłodzenia formy, temperaturę materiału w poszczególnych etapach procesu wtrysku, drogę i kierunek poruszania się materiału wypełniającego formę oraz jego skurcz i ewentualnie z nim występujące zniekształcenia wypraski. Wszystkie powyższe informacje prezentowane są w postaci graficznej z możliwością odtworzenia animacji i podglądu zmian zachodzących w czasie. W niektórych przypadkach generowane są również komentarze oceniające wyniki symulacji oraz gdy jest to konieczne, praktyczne wskazówki służące rozwiązaniu potencjalnego, wykrytego problemu, dotyczącego parametrów procesu wtryskiwania lub geometrii wypraski [11].

### 3.1. Model 3d obiektu analizy

Do budowy modelu wybrany został program CreoParametric amerykańskiej firmy PTC, który przed rokiem 2011 występował pod nazwą „Pro/ENGINEER Wildfire”. Model 3D obudowy został zbudowany, przez zastosowanie operacji parametrycznych modelowania bryłowego, z wykorzystaniem elementów modelowania powierzchniowego. Miało to na celu stworzenie modelu możliwie stabilnego i podatnego na edycję poszczególnych, tworzących go operacji, dla ułatwienia wprowadzania zmian w jego geometrii, po wykonaniu symulacji wtrysku. Niezależnie od rodzaju operacji, schemat postępowania był niezmienny - kształty kolejnych cech były określane przez referencje w postaci wiązań opartych na krzywych i szkicach, które zostały przygotowane wcześniej lub były tworzone na bieżąco. Kształt modelu utworzonej obudowy inspirowany był istniejącymi, rzeczywistymi urządzeniami. Model jest reprezentacją własnej wizji obiektu, podczas tworzenia którego skupiono się także na odwzorowaniu ogólnej formy i kształtu stosowanego już we wzornictwie przemysłowym wyrobów o podobnym przeznaczeniu oraz na uwzględnieniu najważniejszych cech obudowy, nadających jej funkcjonalność, w postaci wycięć, żeber oraz trzpieni montażowych. Końcową postać modelu 3D przedstawiono na rysunku 2.

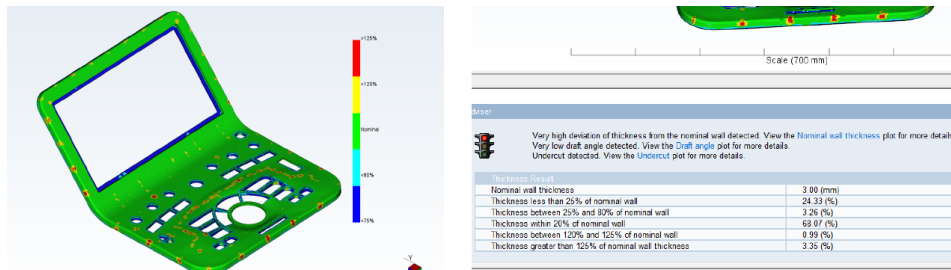


Rys. 2. Model 3D obudowy [opr. własne]

Do wykrycia wad mogących powstać w wyprasce wyprodukowanej na podstawie przygotowanego modelu 3D, posłużono się programem MoldflowAdviser firmy Autodesk. Program ten służy do symulacji komputerowej procesu wtrysku tworzyw sztucznych i analizy zjawisk w jego trakcie zachodzących, wykrywania problemów związanych z geometrią wypraski oraz znajdowania optymalnych ustawień wtrysku. Obiektem analizy



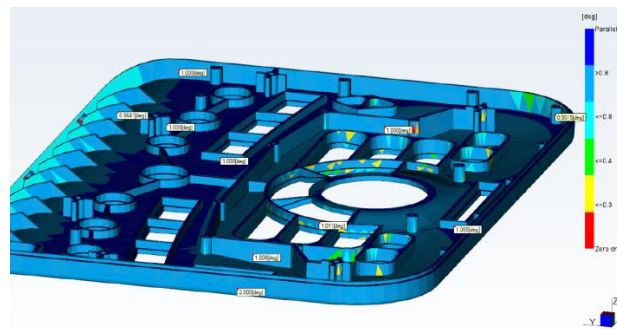
była wirtualna wypraska stanowiąca przygotowany wcześniej w programie typu CAD model 3D. Analizy te zostały przedstawione na rysunkach 3,4,5.



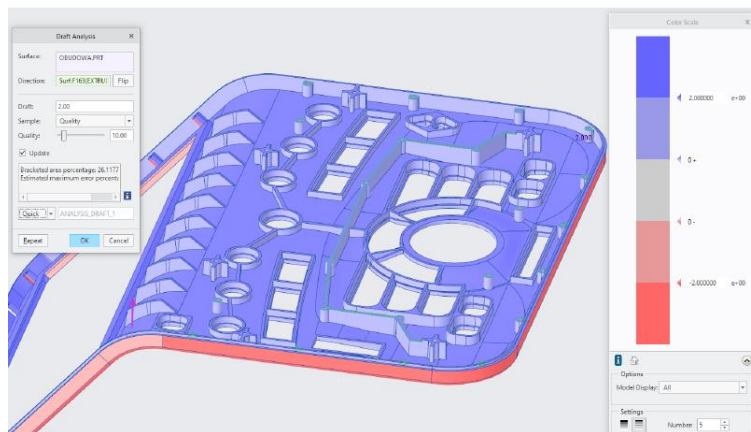
(a) Analiza grubości ścian

(b) Podsumowanie analizy

Rys. 3. Analiza konstrukcji wypraski [opr. własne]

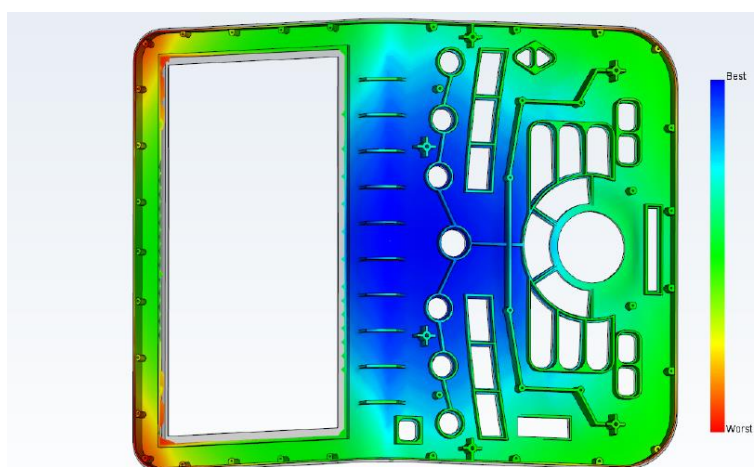


Rys. 4. Analiza pochylenia ścian w programie MoldflowAdviser [opr. własne]



Rys. 5. Analiza pochylenia ścian w programie CreoParametric [opr. własne]

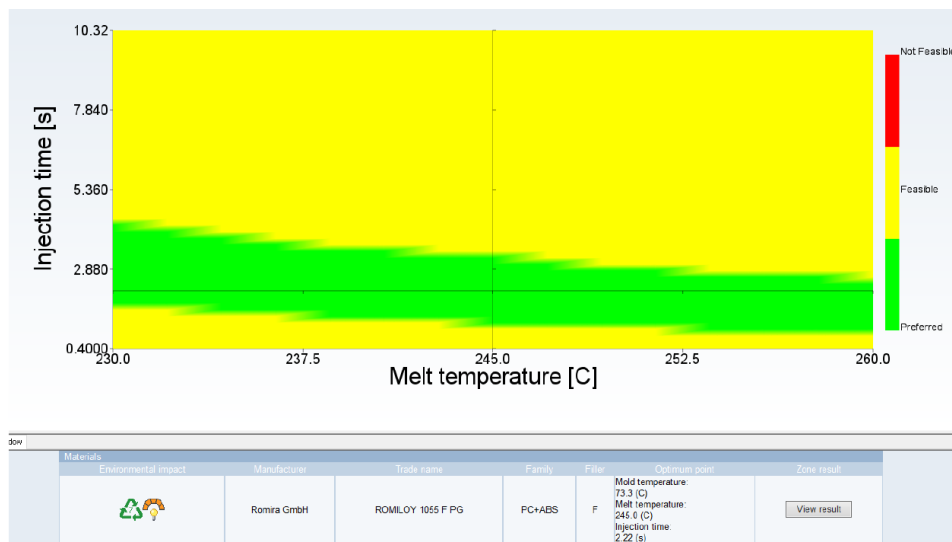
Do przeprowadzenia pełnej analizy wypraski oraz symulacji jej wypełnienia konieczne było określenie pozycji punktu wtrysku materiału. Najpierw wskazano powierzchnie, na których umieszczenie punktu wtrysku nie jest dozwolone, a następnie skorzystano z opcji poddającej ocenie powierzchnię modelu ze względu na to, czy umiejscowienie na niej punktu wtrysku jest optymalne. Program wyróżnił złe, neutralne i dobre obszary na umiejscowienie punktu wtrysku (rys. 6.) - kolorem niebieskim zaznaczony jest obszar, w którym umiejscowienie punktu wtrysku jest najbardziej optymalne, kolorem czerwonym zaznaczony jest obszar, w którym umiejscowienie punktu wtrysku byłoby najmniej korzystne.



Rys. 6. Optymalny obszar wtrysku [opr. własne]

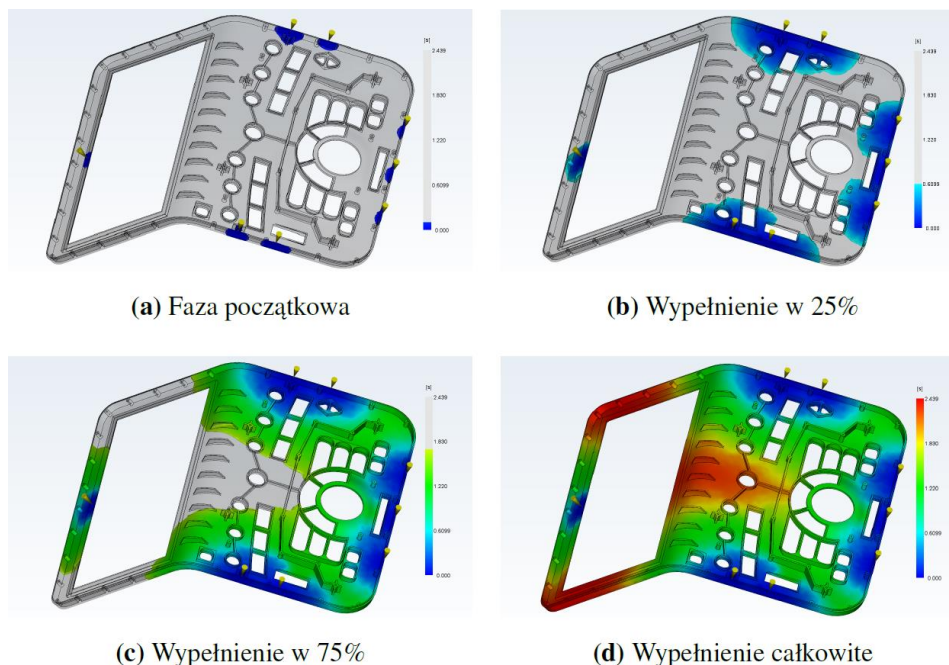
Następnie skorzystano z funkcji „GateLocation”, służącej do automatycznego obliczenia optymalnego położenia punktów wtrysku w wyprasce ze względu na jej geometrię. Z uwagi na duże rozmiary wypraski, zażądano wygenerowania 8 punktów wtrysku. Na tym etapie wymagane było także określenie materiału, z wykorzystaniem którego będzie odbywała się symulacja. W tym celu skorzystano z wbudowanej w program biblioteki materiałów i wybrano materiał z rodziny PC+ABS, o nazwie handlowej ROMILOY 1055 F PG.

Po zdefiniowaniu punktów wtrysku, ostatnim elementem przed przeprowadzeniem właściwej analizy było określenie warunków przetwórstwa wybranego tworzywa. W tym przypadku także odbyło się to dzięki wykorzystaniu przeznaczonej do tego opcji programu o nazwie „Molding Window”. Wynikiem przeprowadzenia analizy Molding Window jest zakres prawidłowych warunków przetwórstwa dla wybranego materiału przedstawiony w postaci wykresu. Sugerowane przez program warunki optymalne ze względu na stabilność procesu, wynoszą odpowiednio dla temperatury stopu 245 °C oraz dla temperatury formy 73 °C, rys.7. Do przeprowadzenia dalszych analiz przyjęto parametry zaproponowane przez program.



*Rys. 7. Sugerowane warunki przetwórstwa [opr. własne]*

W momencie określenia punktów wtrysku, wybrania materiału i określenia warunków jego przetwórstwa, przeprowadzenie pełnej symulacji procesu wtrysku oraz analizy wypełnienia formy było możliwe. Po zakończeniu obliczeń, program przedstawia wyniki analizy w postaci interaktywnej listy. Po wybraniu pozycji z listy, na ekranie przedstawiane są informacje związane z danym zagadnieniem. Wyniki analizy przedstawione zostały w formie graficznej z możliwością śledzenia ich zmienności w czasie. Analiza wypełnienia formy w czasie nie wykazała żadnych nieprawidłowości - wszystkie obszary formy zostały całkowicie wypełnione, a sam proces wypełnienia przebiegał jednostajnie, rys. 8.



Rys. 8. Symulacja wypełnienia formy [opr. własne]

## PODSUMOWANIE

Formy stosowane w procesie formowania wtryskowego stanowią bardzo kosztowne narzędzia, których modyfikacja jest wysoce pracochłonna, a w niektórych przypadkach niemożliwa. Z tego względu należy dążyć do minimalizacji ryzyka wystąpienia błędów oraz rozwiązywania ich, lub świadomej kompensacji ich skutków, już na etapie projektowania wypraski, zanim rozpocznie się proces wytwarzania formy wtryskowej.

Zapobieganie występowaniu błędów realizowane może być dzięki wykorzystaniu wiedzy, doświadczenia i przestrzeganiu podstawowych zasad projektowania wyprasek, jednakże zasady te stanowią jedynie uogólnione wytyczne, których nawet ściśle przestrzeganie, w szczególnych przypadkach może nie przynieść oczekiwanych rezultatów. Techniki symulacji procesu wtryskiwania tworzyw sztucznych pozwalają na sprawdzenie efektu wtryskiwania wirtualnej wypraski, w różnych konfiguracjach warunków brzegowych procesu oraz z wykorzystaniem różnych materiałów, bez konieczności wykonywania kosztownych i czasochłonnych prób eksperymentalnych. Połączenie zasad projektowych oraz wyników analizy wtrysku modelu 3D pozwala na wczesne wykrycie nieprawidłowości jego geometrii oraz jego modyfikację. Program Moldflow w wersji Adviser wykorzystany w pracy do symulacji procesu wtrysku, stanowi narzędzie do wykrywania problemów w wypraskach prostych i o małej szczegółowości. Pomimo stosunkowo niskiej

rozdzielczości otrzymanych wyników analizy, umożliwiły one wykrycie i identyfikację obszarów narażonych na występowanie problemów.

Wykorzystanie wyników analizy procesu wtrysku wypraski oraz przestrzeganie zasad dotyczących technologiczności wyprasek, pozwoliło na utworzenie modelu wypraski technologicznie poprawnej pod kątem wytwarzania w procesie formowania wtryskowego. Pomyślnie wykorzystano techniki wspomagania komputerowego do osiągnięcia celu, w postaci utworzenia modelu 3D obudowy ultrasonografu, zweryfikowania jego technologiczności oraz optymalizacji jego geometrii. Wyniki analiz modelu przed oraz po jego optymalizacji, wykazały możliwe do przewidzenia na podstawie informacji zawartych w części teoretycznej pracy efekty.

Optymalizacja modelu oraz ponowna symulacja procesu wtrysku wykazała także zasadność stosowania tego typu oprogramowania. Działania optymalizacyjne pozwoliły na kilkukrotne zmniejszenie czasu trwania cyklu oraz podniesienie jakości wypraski.

Próba przewidzenia widoczności zniekształceń może okazać się bardzo trudna, ze względu na zależność ostatecznego efektu wizualnego od wielu czynników, w tym od zastosowanego materiału wypraski, ewentualnie zastosowanych powłok, a także od faktury powierzchni. Istnieje możliwość utworzenia foto realistycznego obrazu wirtualnej wypraski z uwzględnionymi wadami, który powinien wskazać skalę występujących w wyprasce problemów i pozwolić na ocenę ich istotności, jednak należy mieć na uwadze fakt, że jest to jedynie symulacja rzeczywistości i w niektórych przypadkach mogą występować znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami analizy, a wynikami eksperymentu przeprowadzonego w warunkach rzeczywistych.

Informacje dotyczące optymalnych warunków wtrysku są bardzo cenne. Ułatwiają one bowiem zaprojektowanie formy oraz oszacowanie kosztów jej produkcji. Analizy udowodniły, że geometria wypraski bezpośrednio wpływa na cały proces i że wpływ ten jest znaczny. Tak niewielka zmiana, jak zmniejszenie grubości żeber, może mieć kolosalne znaczenie i zaważyć o losach i opłacalności produkcji. Wybór najwyższej rozdzielczości analizy był prawdopodobnie działaniem nieuzasadnionym, ze względu na ograniczoną dokładność wyników analiz, spowodowaną niskim stopniem zagęszczenia elementów skończonych siatki. Siatka elementów skończonych, generowana automatycznie przez program, prawdopodobnie skutecznie obniżyła dokładność analiz.

Z tego względu przeprowadzanie analiz z maksymalną rozdzielczością było pozbawione sensu, ponieważ wyniki analiz były ograniczone przez małe zagęszczenie elementów siatki. Pomimo stosunkowo niskiej jakości otrzymanych wyników analizy, uznano je za wystarczające na potrzeby przeprowadzonych działań.

Wyniki analiz pozwoliły na wyciągnięcie wniosków i dokonanie na ich podstawie optymalizacji modelu. Efektem działań podjętych w trakcie realizowania pracy było utworzenie modelu wypraski obudowy aparatu ultrasonograficznego o geometrii zoptymalizowanej do wytwarzania w procesie wtryskiwania tworzyw sztucznych. Zostało to osiągnięte przez bezpośrednie wykorzystanie systemów wspomagania komputerowego oraz dzięki informacjom zawartym w literaturze.

## LITERATURA

- [1] **Górski M., Ł.Sobaszek, A. Świć.** Wykorzystanie komputerowych narzędzi wspierających pracę inżyniera w procesie projektowania elektronicznego urządzenia użytkowego. [w:] *Innowacje w elektronice informatyce i inżynierii produkcji*. Red. K. Bzdyra. Koszalin 2022.
- [2] **Łabendowicz B., Ł. Sobaszek, E. Kosicka.** *Wybrane aspekty zastosowania technik RP w procesie prototypowania elektronicznego urządzenia użytkowego*. [w:] *Innowacje w elektronice informatyce i inżynierii produkcji*. Red. K. Bzdyra. Koszalin 2022.
- [3] **Williamson Timothy.** *History of computers: A brief timeline*. <https://www.livescience.com/20718-computer-history.html>, 01.12.2021. (dostęp z dnia 08.05.2022 r.).
- [4] **Zbigniew Osiński.** *Podstawy konstrukcji maszyn*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.
- [5] **Edward Chlebus.** *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Wrocław, 2000.
- [6] **Irma Gruin.** *Materiały Polimerowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003.
- [7] **Protolabs.** *Formowanie wtryskowe tworzyw sztucznych*. <https://www.protolabs.com/pl-pl/uslugi/formowanie-wtryskowe> (dostęp z dnia 27.11.2022 r.).
- [8] [tworzywa.pl](https://www.tworzywa.pl). *Cechy Wyprasek z Tworzyw Sztucznych*. <https://www.tworzywa.pl/wiedzopedia/czytelnia/cechy-wyprasek-z-tworzyw-sztucznych>, 41.html, 5 2006. (dostęp z dnia 19.02.2023 r.).
- [9] **Jost E. Laumeier Jurgen Hasenauer, Dieter Kuper and Ian Welsh.** *10 głównych zasad stosowanych w konstrukcji detali z tworzyw sztucznych - seria 10 artykułów*, 2013.
- [10] **PROCAD.** *Czym jest AutodeskMoldflow?* <https://www.procad.pl/autodesk-moldflow/>. (dostęp z dnia 24.01.2023 r.).
- [11] **Piotr Kowalewski DymitryCapanidis.** *Przegląd systemów wspomaganie procesów konstruowania i wytwarzania*. Zeszyty Naukowe Dolnośląskiej Wyższej Szkoły Przedsiębiorczości i Techniki. Studia z Nauk Technicznych, 2012, T. 1.



## INFORMACJA O AUTORACH

**Belica Tomasz**, dr inż. Katedra Mechaniki i Projektowania Maszyn, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski

**Bobaryko Waldemar**, SITECH Sp. z o.o. Polkowice, Starszy Inspektor ds. BHP,  
e-mail: waldemar.bobaryko@pl.sitech-automotive.com, - absolwent studiów magisterskich BHP, IIM UZ

**Cal Michał**, mgr inż., kierunek mechanika i budowa maszyn, absolwent Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego

**Jakubowski Julian**, dr inż., prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Zielonogórski, e-mail: j.jakubowski@iim.uz.zgora.pl

**Jędrzejewska Aleksandra**, mgr inż., Park Naukowo-Technologiczny Uniwersytetu Zielonogórskiego Sp. z o.o., Uniwersytet Zielonogórski, Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Technicznych – doktorant, Absolwent Wydziału Mechanicznego, [a.jedrzejewska@pnt.uz.zgora.pl](mailto:a.jedrzejewska@pnt.uz.zgora.pl)

**Jurgas Patryk**, absolwent Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego

**Każmierczak Paweł**, mgr inż., Park Naukowo-Technologiczny Uniwersytetu Zielonogórskiego Sp. z o.o., [p.kazmierczak@pnt.uz.zgora.pl](mailto:p.kazmierczak@pnt.uz.zgora.pl)

**Kielec Roman**, dr inż. prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Mechanicznej, [r.kielec@iim.uz.zgora.pl](mailto:r.kielec@iim.uz.zgora.pl)

**Królik Dariusz**, dr inż., adiunkt, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Zielonogórski

**Lasota Andrzej Marek**, dr inż., Instytut Inżynierii Mechanicznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski, e-mail: A.Lasota@iim.uz.zgora.pl

**Malinowski Marek**, dr inż. Katedra Mechaniki i Projektowania Maszyn, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski

**Mądry Katarzyna** – studentka studiów II stopnia, kierunek: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski

**Pająk Iwona**, dr inż. Instytut Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Zielonogórski

**Polańczyk Kornel**, absolwent Ratownictwa medycznego UZ, student II stopnia kierunku Bezpieczeństwo i higiena pracy UZ



**Przymuszała Mateusz**, absolwent Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego

**Rybakowski Marek**, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Mechanicznej e-mail: m.rybakowski@iim.uz.zgora.pl

**Salamaj Marek**, dr. Inż., Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, Instytut Inżynierii Mechanicznej, e-mail: M.Salamaj@iim.uz.zgora.pl

**Senkowska Patrycja** – absolwentka Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego

**Śliwa Małgorzata**, dr inż. Instytut Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego, Katedra Informatyki i Automatyzacji Produkcji.

**Tetera Mateusz**, student studiów I stopnia na kierunku: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Wydział Mechaniczny UZ, pracownik przedsiębiorstwa świadczącego usługi logistyczne, specjalista ds. zamówień i obsługi SAP.